

# 修士論文

## CFRP 材の超音波トリム加工における ローラーを用いた切断部近傍変形の抑制

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

南部優友

## 目次

1 緒言 .....	1
2 加工原理 .....	3
2.1 超音波カッター .....	3
2.2 ローラーによる変形減少 .....	6
3 実験装置及び試験片 .....	7
3.1 実験装置 .....	7
3.2 刃具とローラー .....	10
3.3 試験片 .....	11
3.4 切断荷重測定 .....	12
4 試験片観察方法及び評価方法 .....	12
5 ローラー材質の熱伝導率による比較 .....	16
5.1 実験目的及び条件 .....	16
5.2 実験結果 .....	17
5.3 考察 .....	21
6 刃とローラーの位置関係による比較 .....	22
6.1 実験目的及び条件 .....	22
6.2 実験結果 .....	23
6.3 考察 .....	28
7 結言 .....	32
参考文献 .....	33
謝辞 .....	34

## 1 緒言

炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastics：CFRP）は炭素繊維と樹脂の複合材料であり、軽量で、機械的性質が優れており、耐食性があるという性質を持っている。<sup>1)</sup> さらに、疲労強度に強い、耐薬品性に優れる、通常の熱的環境では安定といった様々な特性があり、スポーツ・レジャー用途や自動車・バイク、土木建築、産業機器などに採用されている。<sup>2)</sup> 特に、二酸化炭素排出量削減や燃費向上を目的とした、航空機の機体・自動車の車体の軽量化に用いられている。<sup>3)</sup> 2050年までに政府がカーボンニュートラルを目指すと言明し二酸化炭素削減がより一層求められるようになり<sup>4)</sup>、それに伴いCFRP利用への期待も高まると考える。実際に航空機B787の一次構造材料に採用され機体構造重量の50%がCFRPで作られている。従来の航空機と比べて大幅に軽量化しており、燃費の20%の向上、それに伴う一回の給油での航続距離の増加、二酸化炭素排出量の低減など多くのメリットが挙げられる。<sup>3)</sup>

このように、優れた構造材料であるCFRPは様々な方法で成形される。オートクレーブ（圧力容器）を用いて、強化材となる炭素繊維に樹脂が含浸されたプリプレグと呼ばれるシート状の中間材料を使用し、加熱・加圧・真空引きをしながら樹脂を硬化させるオートクレーブ成形・強化材となる炭素繊維の基材（織物などの中間基材）を金型内に設置した後、樹脂を注入して硬化させるRTM（レジン・トランスファー・モールドディング：樹脂注入）成形・あらかじめ加熱しておいた金型にプリプレグやSMC基材、BMC基材等の中間基材を入れ、プレス機によって加圧しながら硬化させるプレス成形などがある。<sup>2)</sup> これらのいずれの成形法も加圧加熱プロセスにおける強化繊維のズレや母材樹脂の逃げにより高精度の成形が困難であることや、成形後の余剰部分の除去のために、トリム加工のような二次加工が必要となる。

CFRPは難削材として知られ、トリム加工にはAWJ（アブレイシブウォータージェット）やエンドミルを使用するのが一般的である。<sup>5)</sup> AWJは加工面品質が良いが、貫通した加工しかできないため加工可能な形状に制約があることに加え、初期投資・維持費ともに高コストである。また、エンドミルは汎用機械加工設備で加工が可能のため形状による加工の制約が少ない。しかし、CFRP繊維の層間剥離が発生し易く加工能率をあげられない、工具寿命が短い<sup>5)</sup>、微細な切り屑が飛散するという問題が挙げられる。<sup>6)</sup> 特に切り屑は、高い伝導性に起因する電気系統の短絡、皮膚の付着による湿疹や痒み、吸引による肺や気管への影響といった、機械や人体への悪影響が懸念されている。<sup>6)</sup>

これらの問題を解決するため、最近では超音波カッターも用いられている。超音波カッターは刃物を長手方向に1秒間に20,000～40,000回（20kHz～40kHz）振動させることで、通常のカッターでは切断しにくい樹脂製品やゴム製品、不織布、これらを重ね合わせた複合材料などの切断を容易に行える。また、初期費用やランニングコストが安価でメンテナンス性に優れる他、切り粉や汚水、騒音、煙をほぼ排出しないので環境面にも配慮するこ

とができる。<sup>7)</sup> しかしながら、超音波振動の摩擦熱で樹脂を軟化させながら加工を行い切断部近傍が大きく変形してしまう。発生した変形は研削加工といった仕上げ加工を行う必要があり、加工効率の低下・切り屑の排出といった問題につながる。

本研究室では、問題となっている切断部近傍の変形を減少させるために、超音波カッターの加工と同時に、切断部近傍をローラーで挟み込む手法が提案され研究が行われている。ローラーを用いることで変形抑制の効果は得られたものの、理想的な断面とは言えず、十分なデータが取れていない。そのため本研究では、変形抑制に最も影響を与える要因を探るため、実験条件を変え比較を行った。

## 2 加工原理

### 2.1 超音波カッター

超音波カッターは一般的に、刃物を長手方向に周波数 20kHz~40kHz, 振幅数  $\mu\text{m}$ ~数十  $\mu\text{m}$  で振動させながら加工をおこなう。図 2.1 のように材料に切り込んだ刃は最下点まで加工を進め、上方へ戻る際に最下点での加工面より刃が離れる。そして、再び材料に切り込む。このような断続切削が毎秒数万回という高速で繰り返し行われるため、加工物に微細な破壊が生じ、刃物の加工負荷を大幅に低減することができる。

さらに、本研究で使用する CFRP 板の母材はポリカーボネート樹脂(PC)である、PC はガラス転移温度 (約 120~130°C) を超えると、ガラス状からゴム状に変化し強度が低下 (軟化) する性質がある。<sup>8)</sup> 超音波振動する刃具は摩擦熱を生じ、その摩擦熱により PC が軟化し、炭素繊維を切断するだけで加工が進行するので加工荷重を低減することができる。

しかしながら、摩擦熱を利用し樹脂を軟化させて加工を行うことで、切断面近傍において図 2.2 のような変形が生じてしまう。図 2.2 の形状は図 2.3 の青い点線の形状を示す。変形した部分は仕上げ加工で除去する必要がある、一般的な仕上げ加工の一回の切り込み量は 0.01mm~0.1mm であることを考えると、加工能率に大きく影響を与えてしまう。また、この際に発生する切り屑は機械にも人体にも悪影響であるため変形をできるだけ抑える必要がある。

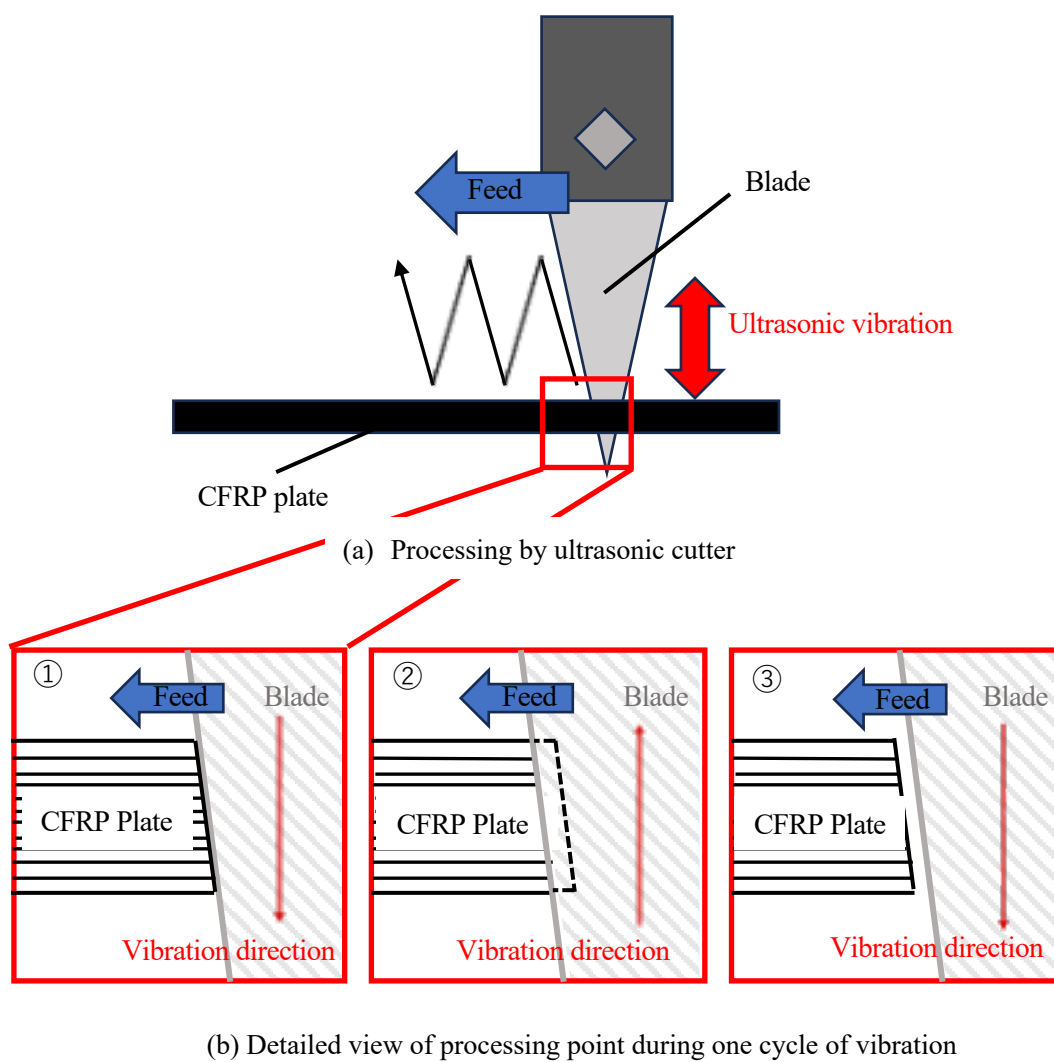


Fig.2.1 Principle of ultrasonic cutter

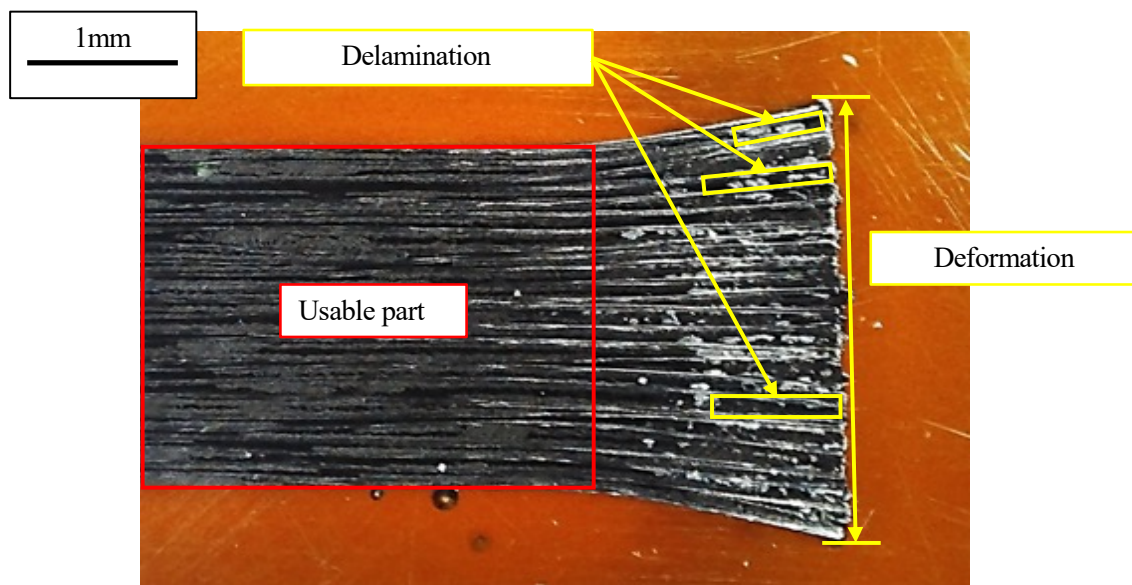


Fig.2.2 Deformation near the cutting part

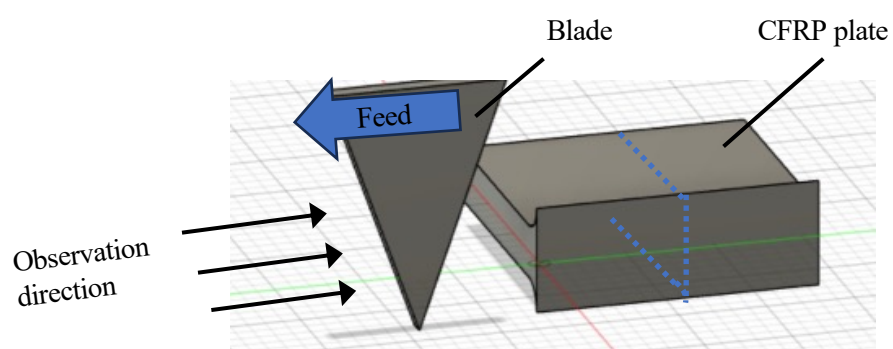


Fig.2.3 Line showing cross section of cutting part

## 2.2 ローラーによる変形減少

超音波カッターによって生じた変形を，図 2.4 のようにローラーで挟み込む．摩擦熱によって樹脂が軟化しているおり，ローラーを用いて切断後すぐに挟み込むことで切断中に生じた変形を減少できる．さらに，金属ローラーを用いているため熱伝導により簡易的な冷却効果が生じる．高温になり軟化した樹脂を挟み込む際に冷やし固めることで，形状を維持することも期待できる．

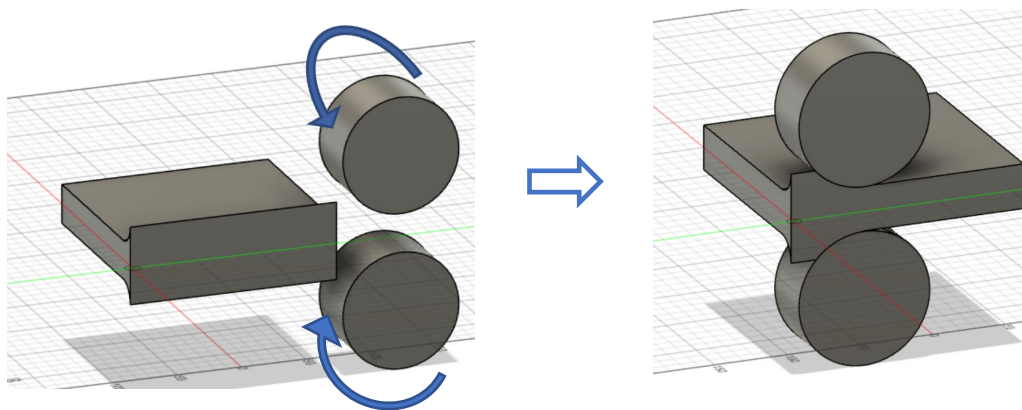


Fig.2.4 Reduction of deformation by rollers



### 3 実験装置及び試験片

#### 3.1 実験装置

図 3.1 は本研究に用いた実験装置の概要である。最大出力 500W の超音波発振器(株式会社ソノテック SH-3510)と、周波数 22kHz, 最大振幅 50 $\mu$ m, 軸方向振動の超音波振動子(株式会社ソノテック SF-8500RR)を使用した。試験片となる CFRTP 板は、治具に挟むことで固定した。超音波カッターとローラーは同じ台に固定されており、図 3.2 のように刃の中心線と二つのローラーの中心を結んだ線が一致するように調整した。この台はボールねじを用いて送ることができる。実験装置に固定された試験片に向かって超音波カッターとローラーを送ることで切断する。刃と試験片が極めて近い状態に設置し、超音波振動子を発振させて刃が振動していることを確認してから刃の送りを開始させ、刃と試験片が完全に離れるまで移動させた後、超音波振動子を停止させた。

図 3.1 の赤い矢印の方向から見た図を図 3.3 に示す。台座の下敷板で刃とローラー間の距離を 0.1mm に調整した。ローラー間の距離は試験片の厚さと等しくなるように設定した。試験片の厚さは一定ではないため、加工毎に試験片に合わせて設定を行った。

ローラーは図 3.4 のような形で固定した。T 字ブロックの下面と側面で位置決めするために、凹型ブロックの上面と側面からねじをさし固定した。刃とローラー間の距離がかなり小さく加工中や設定中にローラーがずれると刃と接触してしまうため、T 字ブロックを台座に強固に固定した。

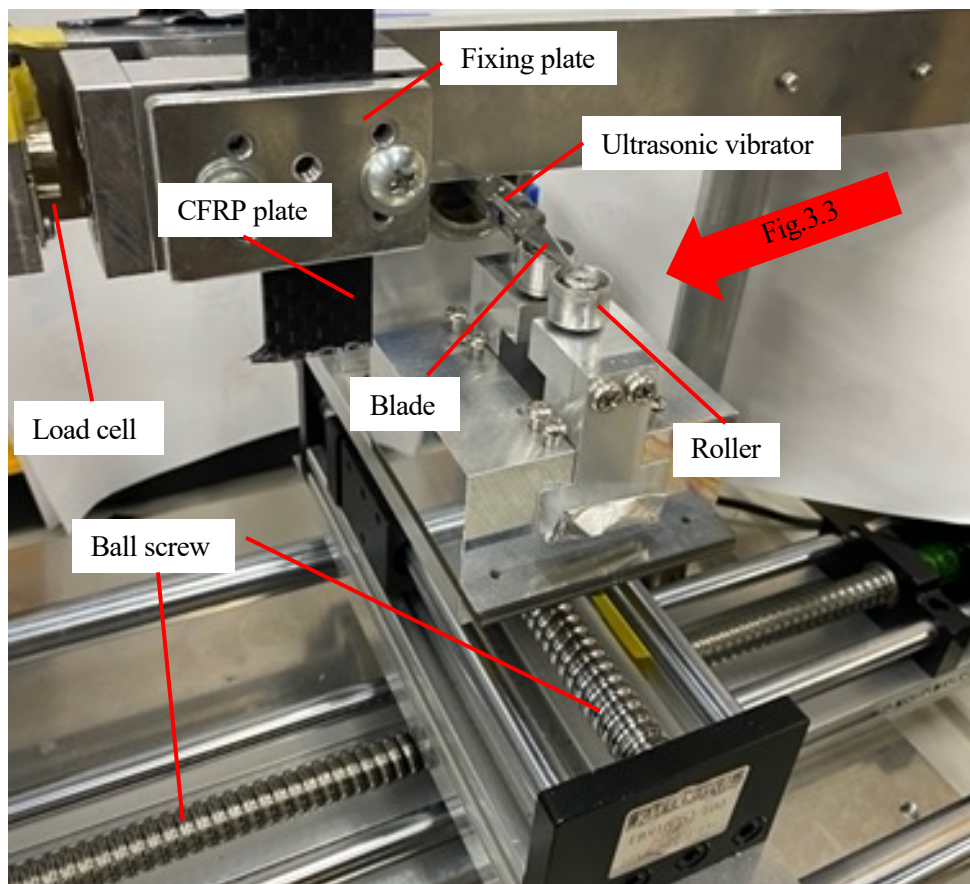


Fig.3.1 Experimental equipment

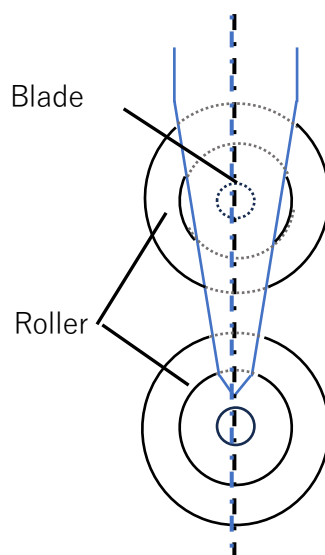


Fig.3.2 Roller and blade position

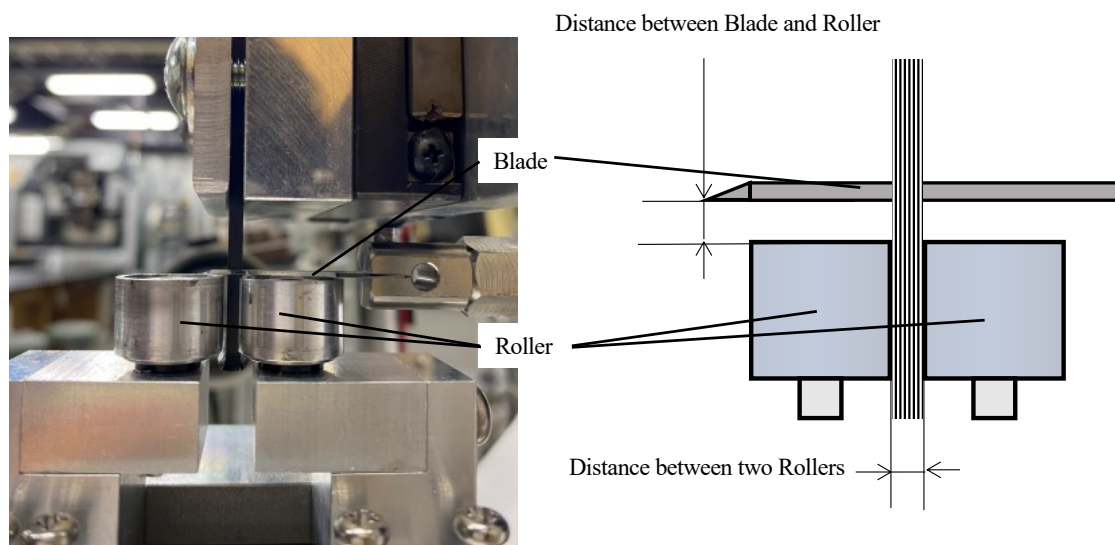


Fig.3.3 Enlarged view of the equipment from the side

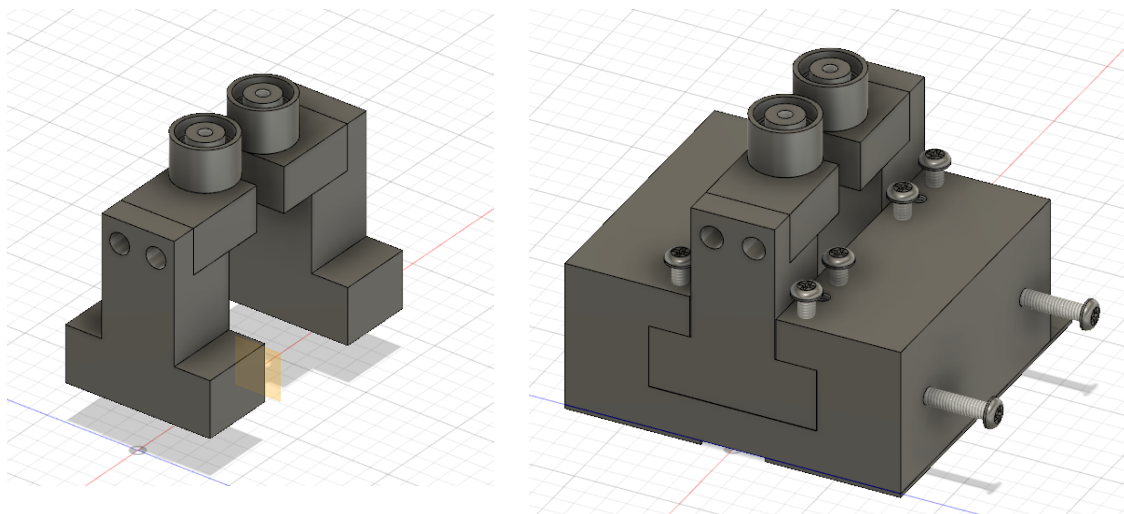


Fig.3.4 Roller fixing method

### 3.2 刃具とローラー

本実験に用いた刃具（株式会社ソノテック FB-3236-6L4K）を図 3.5 に示す．片刃の形状をしており，材質は超硬合金で，厚さは 0.6mm である．図 3.5 の刃の断面形状の下側でローラーを用いる．

ローラーは直径 16mm，高さ 11mm のものを使用し，図 3.6 に示す．材質はジュラルミンとステンレス製のものを使用した．

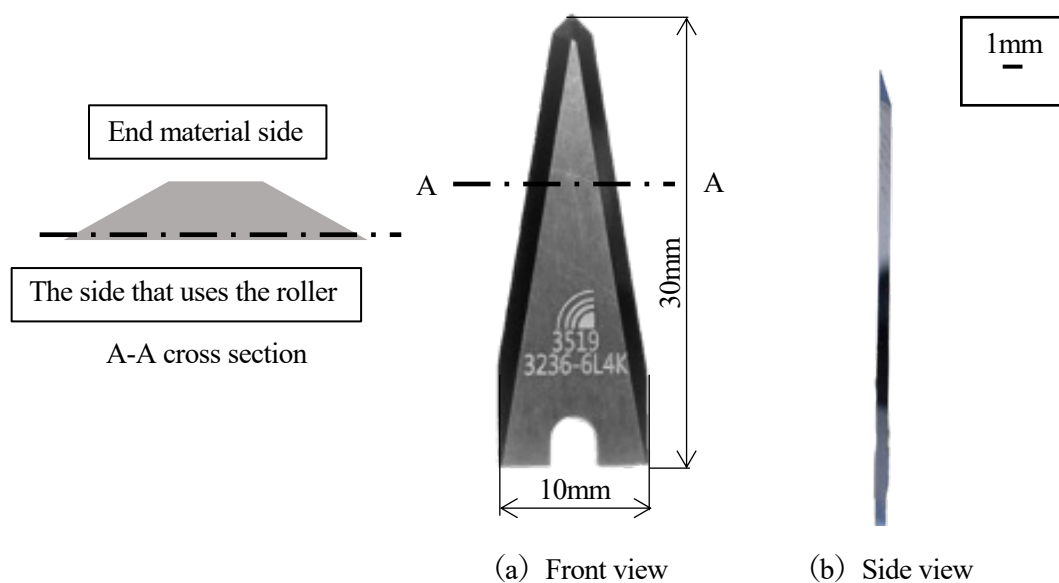


Fig.3.5 Single edged tool (FB-3236-6L4K)

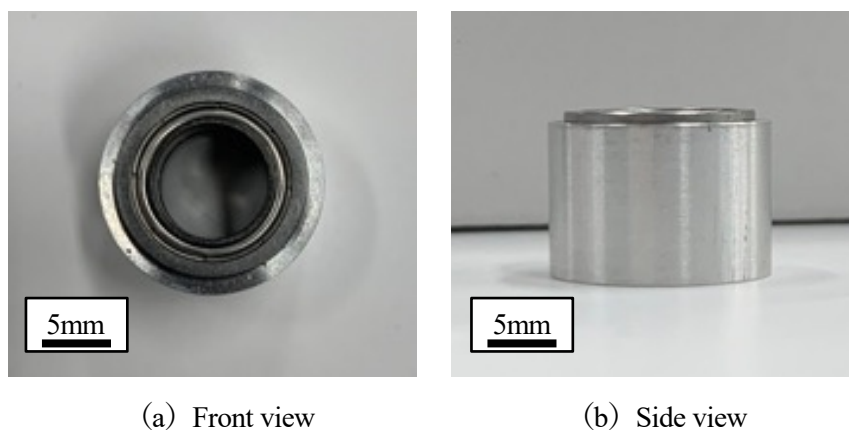


Fig.3.6 Roller

### 3.3 試験片

今回の実験では、ポリカーボネート(Polycarbonate : PC)樹脂を母材とした熱可塑性 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Thermo Plastics : CFRTP) 板を使用した。

試験片厚さは 2.1~2.2mm で、切断長さである試験片幅は 25mm である。試験片下端から 15mm の位置を切断した。

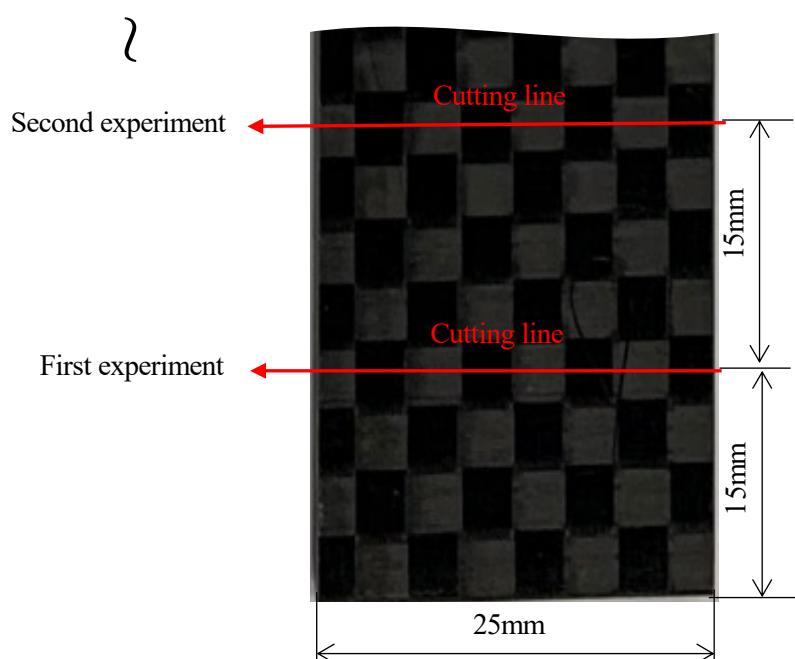


Fig.3.7 CFRTP plate

### 3.4 切断荷重測定

切断荷重は、ロードセル（株式会社エー・アンド・デイ LCC21N500）と動ひずみ測定器（株式会社共和電業 DPM-711B）を用いて測定した。試験片を固定している治具が左右にスライドする機構をしている。試験片に超音波カッターとローラーから力が加わり、試験片が送り方向に押されロードセルに力が加わる。この、試験片が押された力を切断荷重とし計測した。刃とローラーを送り始めたタイミングで計測を始め、工具が完全に通過したタイミングで終了した。

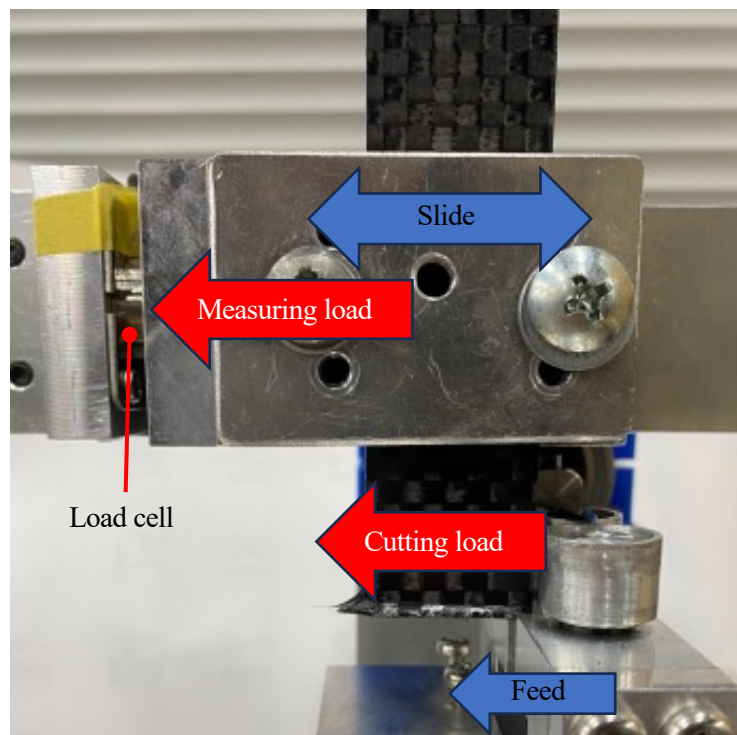


Fig.3.8 Cutting load measurement method

## 4 試験片観察方法及び評価方法

切断部近傍の変形を損傷させずに観察するために、図 4.1 に示した観察方法を用いた。まず、切断後の試験片を赤インクで着色したエポキシ系常温硬化樹脂で埋め込みを行った。埋め込みを行った後にダイヤモンドカッターで切断し、断面を耐水ペーパーで研磨し、バフ研磨を行った。その後、断面をデジタルマイクロスコープ（アルファーマラージュ株式会社 DIM-03）で観察した。

切断面は図 4.2 の各パラメータを用いて評価をおこなった。

試験片の元の厚さを“ $e$ ”とし、

切断前の試験片と比べて切断後に変形した厚さ（以下「厚さ方向の変形」と呼ぶ）を

$$a + b \text{ [mm]}$$

で表す。

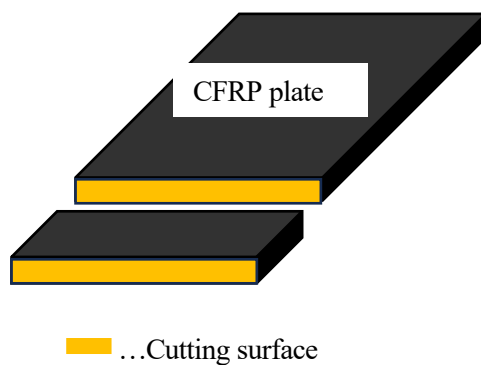
また、切断面から厚さ方向の変形の影響を受けている長さ（以下「影響長さ」と呼ぶ）を

$$(c + b)/2 \text{ [mm]}$$

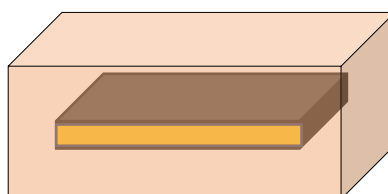
で表す。

これら二つのパラメータを用いて評価し比較を行った。

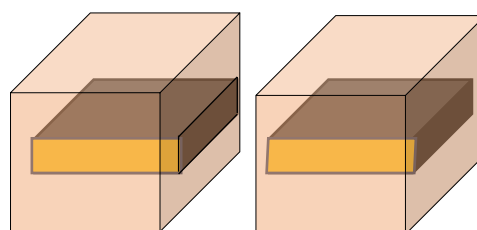
## ① Trimming



## ② Embedding in resin



## ③ Cut by grinder



## ④ Polishing

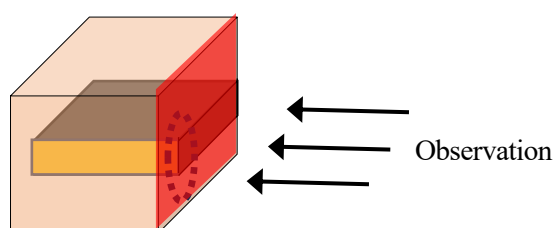


Fig.4.1 Procedure for observing specimen



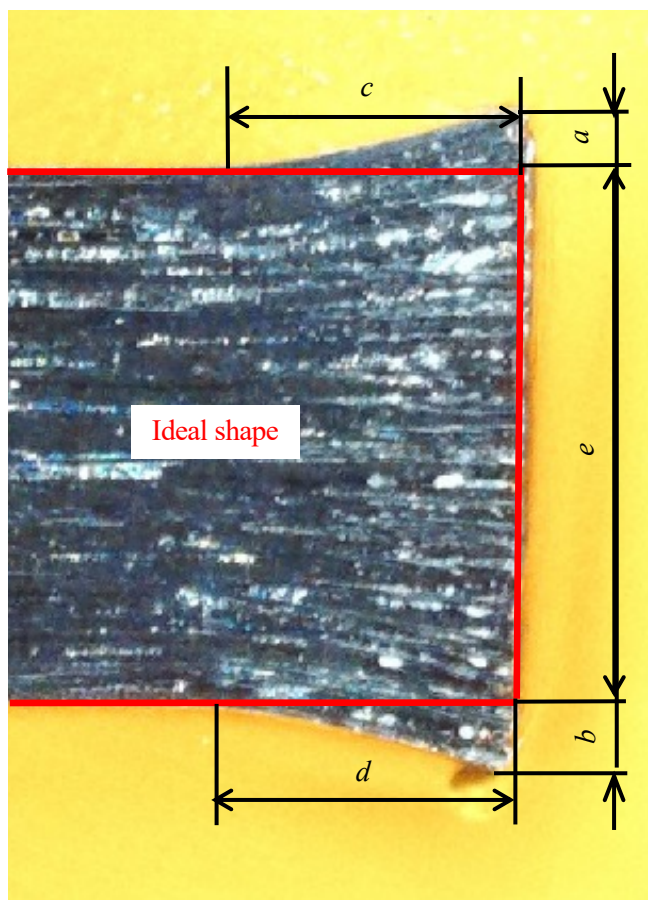


Fig.4.2 Evaluated value of deformation near the cutting part

## 5 ローラー材質の熱伝導率による比較

### 5.1 実験目的及び条件

摩擦熱により変形した切断部近傍をローラーで元の形状に押し戻す際の、冷却速度の差が変形量に与える影響を探るため実験を行った。そのため、熱伝導率が異なるジュラルミンとステンレスのローラーで加工した。今回用いたジュラルミン（A2017）の熱伝導率は  $201(\text{W/m} \cdot \text{K})$  で、ステンレス（SUS304）は  $16.7(\text{W/m} \cdot \text{K})$  である。また、比較のためにローラー無しでの実験も行った。各条件で実験を行った後に、切断部近傍の変形量評価と切断荷重測定をした。

Table5.1 experimental conditions

	With roller, Without roller
Roller Material	Stainless steel, Duralumin
Feed speed	1mm/s
Distance between blade and roller	0.1mm
Distance between rollers	2.1~2.2mm (Test piece thickness)

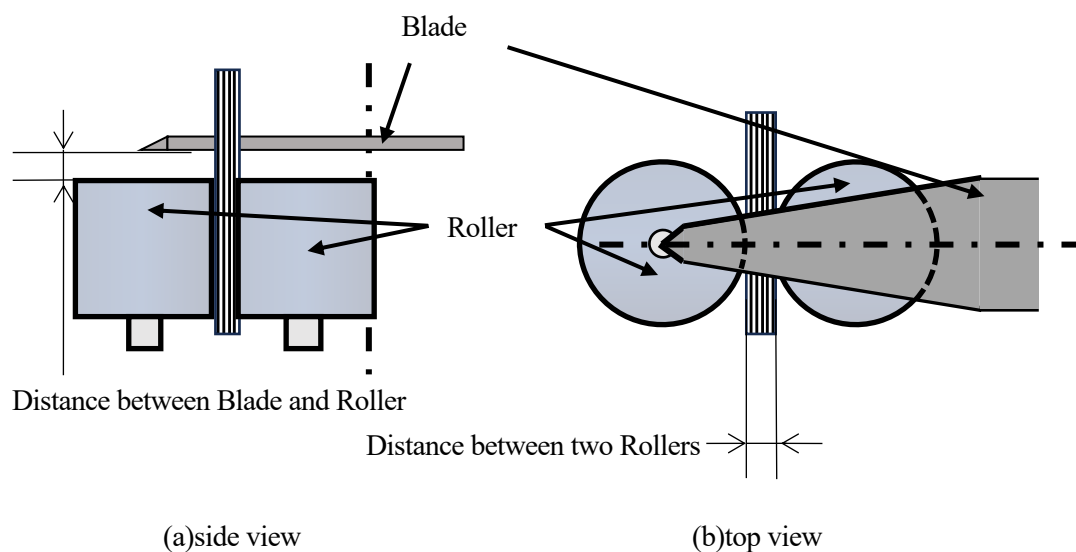


Fig.5.1 Enlarged view of the equipment

## 5.2 実験結果

切断部近傍の変形量評価の結果を図 5.2 に示した。図 5.2 の(a)に厚さ方向の変形，(b)に影響長さを示し，各点の平均値を白抜きで示した。各条件の平均値に変形量が最も近い切断部近傍を図 5.4 に示した。まず，ローラー有無によって比較を行うと，ローラーがある場合厚さ方向の変形，影響長さ共に小さい値となり変形抑制効果が得られた。最も変形が抑制されたジュラルミンローラーとの平均値を比較すると，ローラーなしの場合と比べてジュラルミンローラーは厚さ方向の変形が約 7 割小さくなり，影響長さも約 6 割小さくなった。また，ローラー材質の違いによる平均値比較を行うと，ステンレスローラーと比べてジュラルミンローラーは厚さ方向の変形が約 5 割小さくなり，影響長さも約 3 割小さくなった。

切断荷重測定の結果を図 5.3 に示した。どの荷重も同じ傾向を得られたので代表的なものを示す。切れ刃と試験片が接触したタイミングを 0 秒として図に示した。どの条件においても，基本的には 5~10N 程度の荷重で加工が進行した。しかし，ローラーがある場合は約 2.5 秒のタイミング 20N 程度まで荷重が増加した。

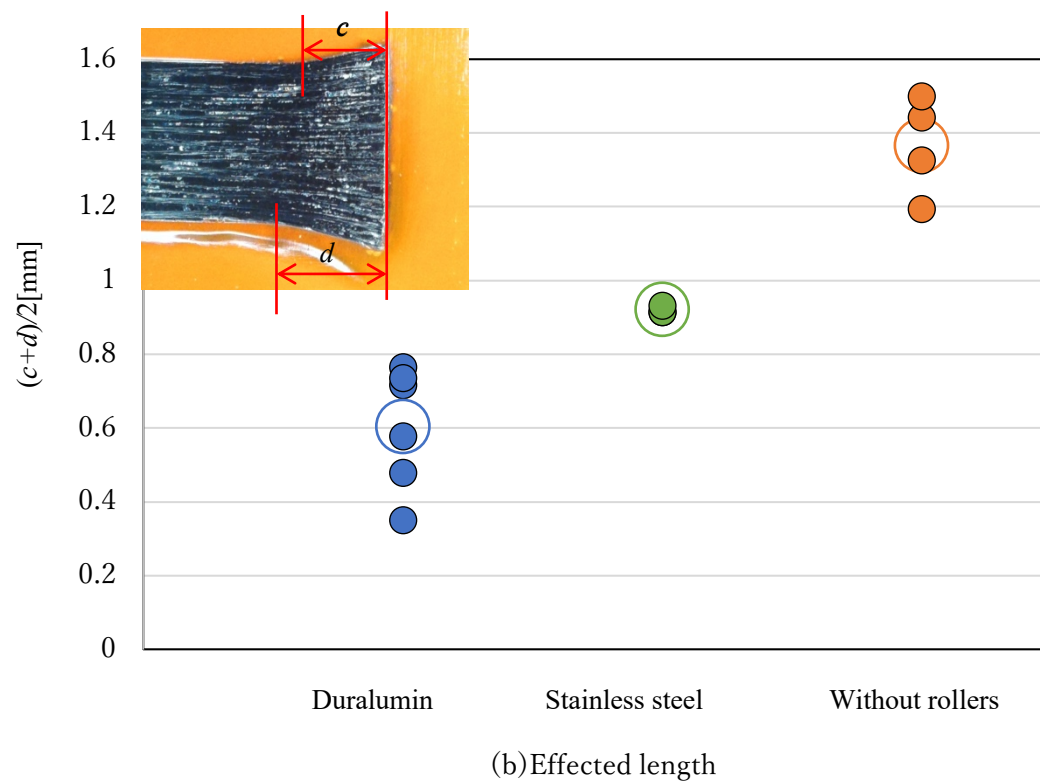
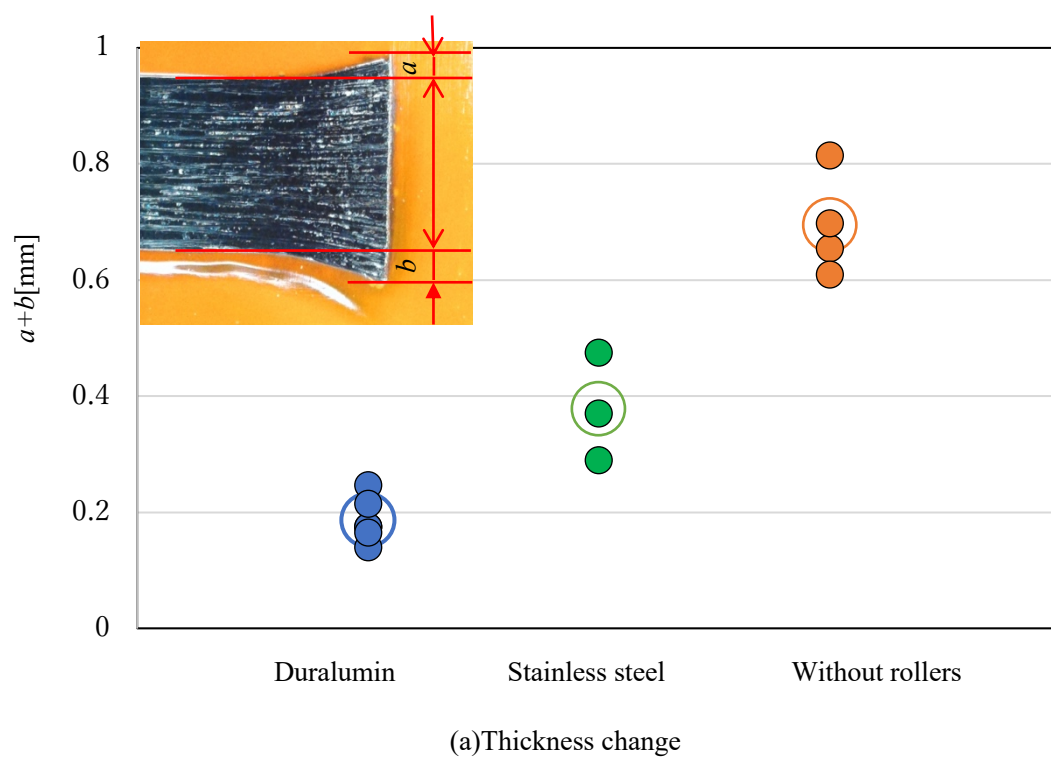
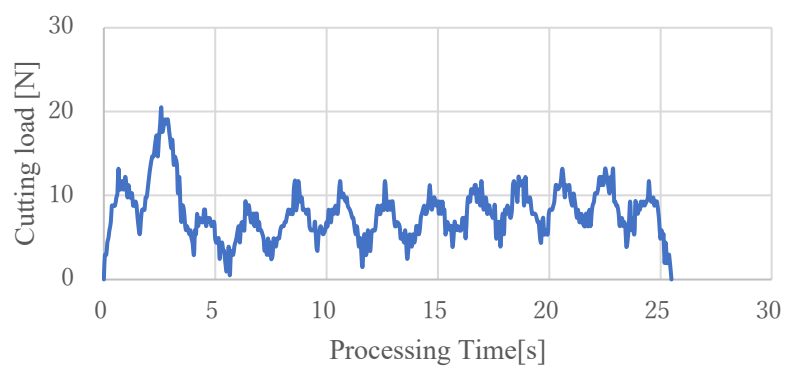
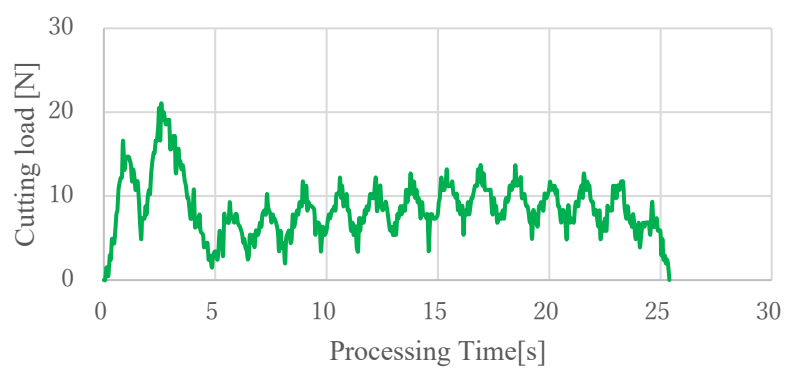


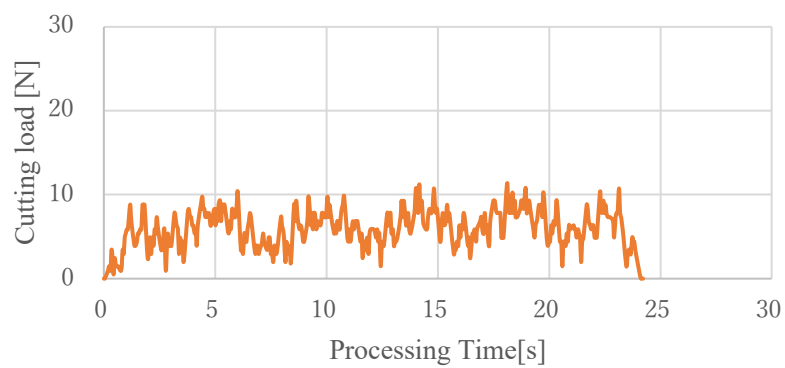
Fig.5.2 Comparison of deformation by roller material



(a) Duralumin roller

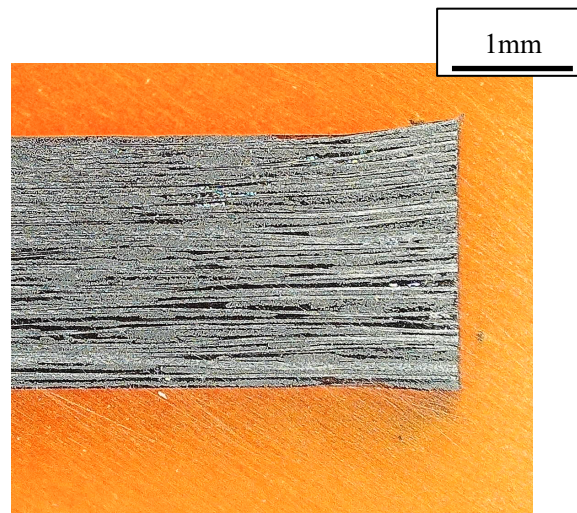


(b) Stainless steel roller

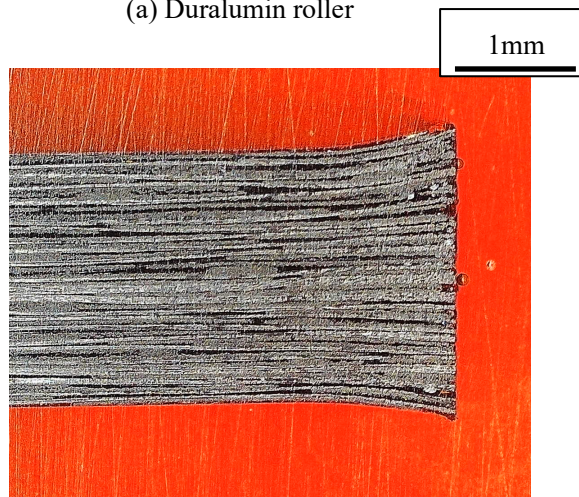


(c) Without roller

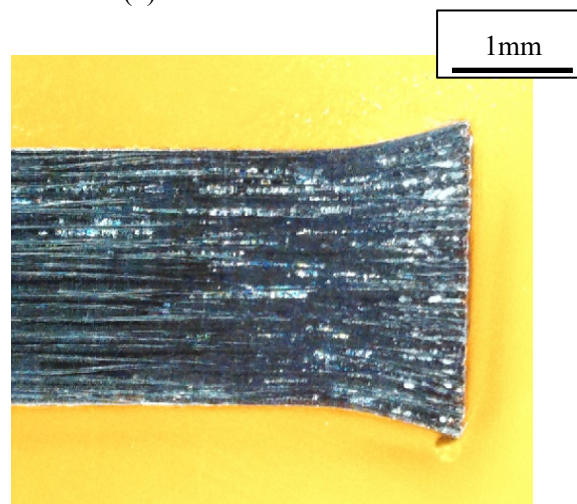
Fig.5.3 Comparison of cutting load by roller material



(a) Duralumin roller



(b) Stainless steel roller



(c) Without roller

Fig.5.4 Typical image for each condition near the cut area

### 5.3 考察

ジュラルミンローラーとステンレスローラーの変形量を比較すると、厚さ方向の変形と影響長さともにジュラルミンローラーの方が小さい値となった。熱伝導率が高いジュラルミンにおいて切断部近傍の変形が小さく、ローラーで押し戻す際により早く冷やすほど変形が小さくなるとわかった。このことから、より早く冷やすことでローラー通過後に切断部近傍が十分に硬化し、押し戻した形状を維持できると考えられる。

さらに、図 5.3 の切断荷重において、ローラーがある場合に荷重が上がる箇所があったが、これは金属ローラーの吸熱効果により試験片から熱が逃げ切断荷重が増加したことが原因だと考えられる。図 5.5 のように試験片と刃が接触した位置から、ローラーと試験片が接する位置までの距離が約 2.2mm であり、図 5.6 と比べると荷重が増加し始めたタイミングと一致している。

本実験結果から冷却速度が変形減少に影響を与えるとわかったため、次に冷却のタイミングに着目して実験を行った。

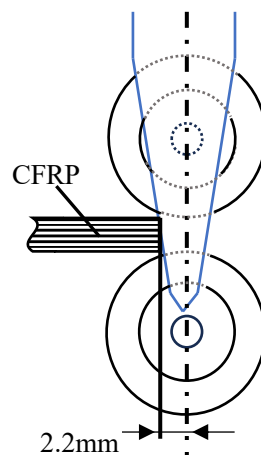


Fig.5.5 Positioning of blade and roller

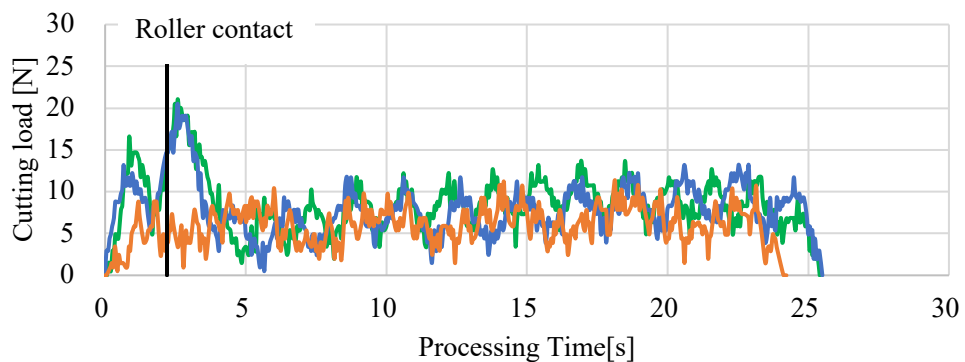


Fig.5.6 Position of roller contact and increased load



## 6 工具切れ刃とローラーの位置関係による比較

### 6.1 実験目的及び条件

試験片を切断してからローラーで押し戻し始めるまでのタイミングが，変形量に影響を与えるのかを調べるため実験を行った．そのため，切れ刃とローラーの位置関係を変更し加工を行った．図 6.1 のように二つのローラーの中心を結んだ線と刃の中心線が一致した位置を基準(0mm)として，-1mm～+5mm まで 1mm 間隔でずらし計 7 つの条件で加工を行った．また，比較のためにローラーなしのデータも示す．各条件で実験を行った後に，変形量評価と切断荷重測定をした．

Table 6.1 experimental conditions

Measuring range	-1mm～+5mm
Roller Material	Duralumin
Feed speed	1mm/s
Distance between blade and roller	0.1mm
Distance between rollers	2.1～2.2mm (Test piece thickness)

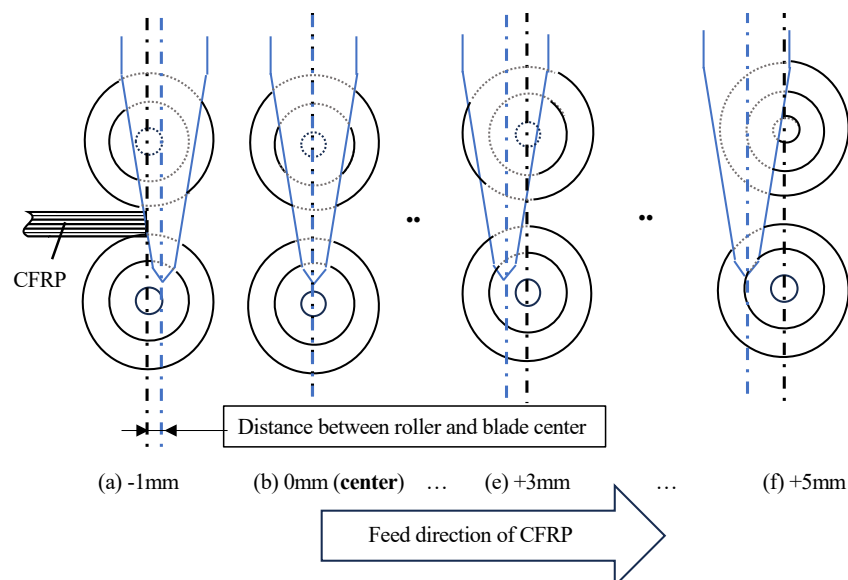


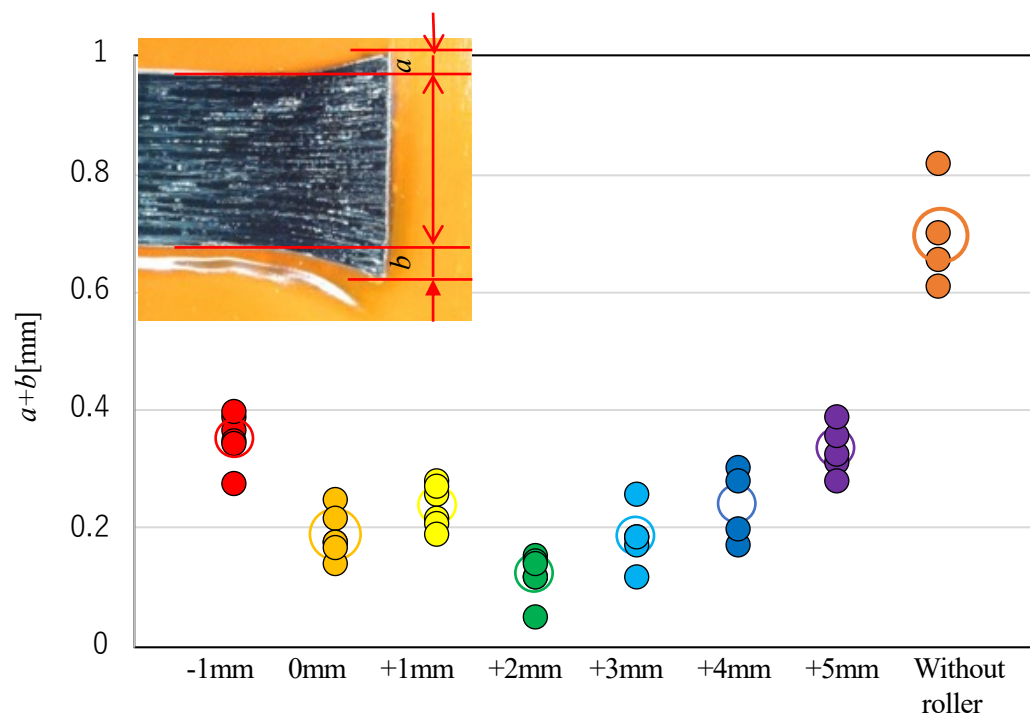
Fig.6.1 Change in blade and roller positioning



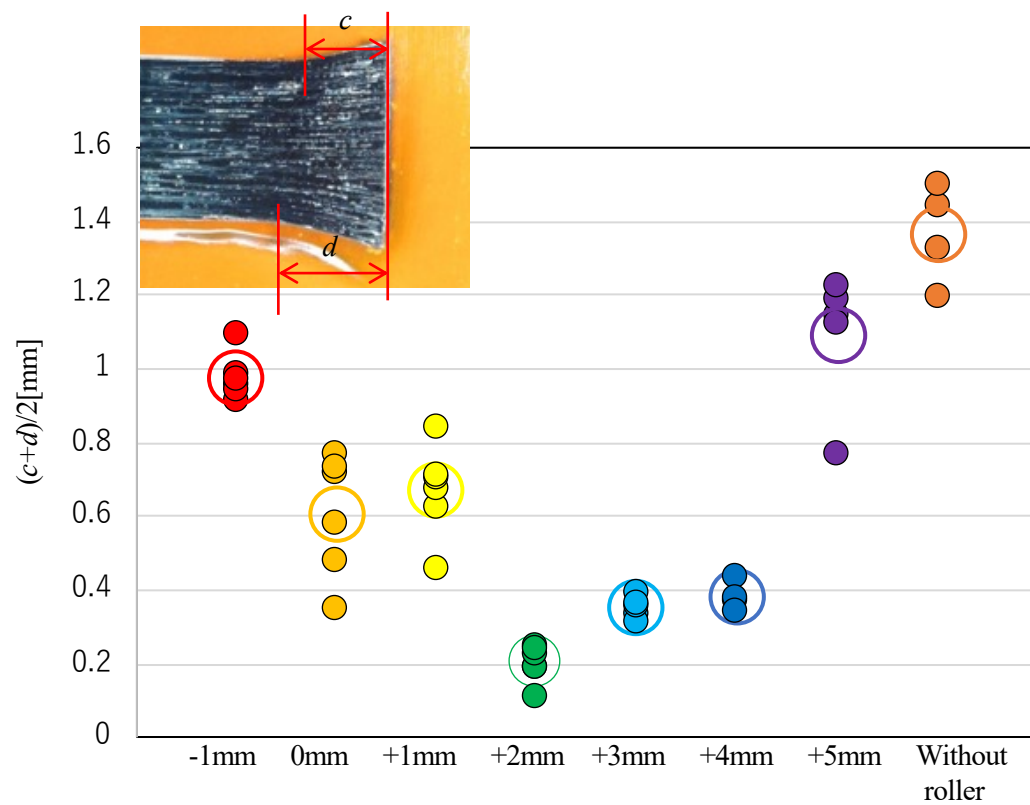
## 6.2 実験結果

変形量評価の結果を図 6.2 に示した。図 6.2 の(a)厚さ方向の変形, (b)に影響長さを示し, 各点の平均値を白抜きで示した。各条件の平均値に変形量が最も近い切断部近傍を図 6.5 に示した。刃が試験片を切断してからローラーが挟み始めるまでのタイミングを変更した条件の各平均値を比較すると, 厚さ方向の変形, 影響長さともに, -1mm から+2mm になるにつれて値が小さくなり, +2mm から+5mm になるにつれて値が大きくなるという傾向が見られた。最も変形の小さい+2mm とローラーなしの平均値を比較すると, ローラーなしの場合と比べ厚さ方向の変形が約 8 割小さくなり, 影響長さも約 8 割小さくなった。

切断荷重測定の結果を図 6.3 と図 6.4 に示した。同様の傾向が見られたものは代表的なものを示した。刃とローラーが接触したタイミングを 0 秒として図に示した。どの条件においても, 基本的には 5~10N 程度の荷重で加工が進行した。-1mm, 0mm では, 加工開始直後に荷重が増加した。+1mm においては荷重が増加したものと増加せずに加工が進行していく 2 パターンを示した。+2mm から+5mm では加工開始直後の荷重の増加は見られなかった。



(a) Thickness change



(b) Effected length

Fig.6.2 Comparison of deformation by positioning of blade and roller

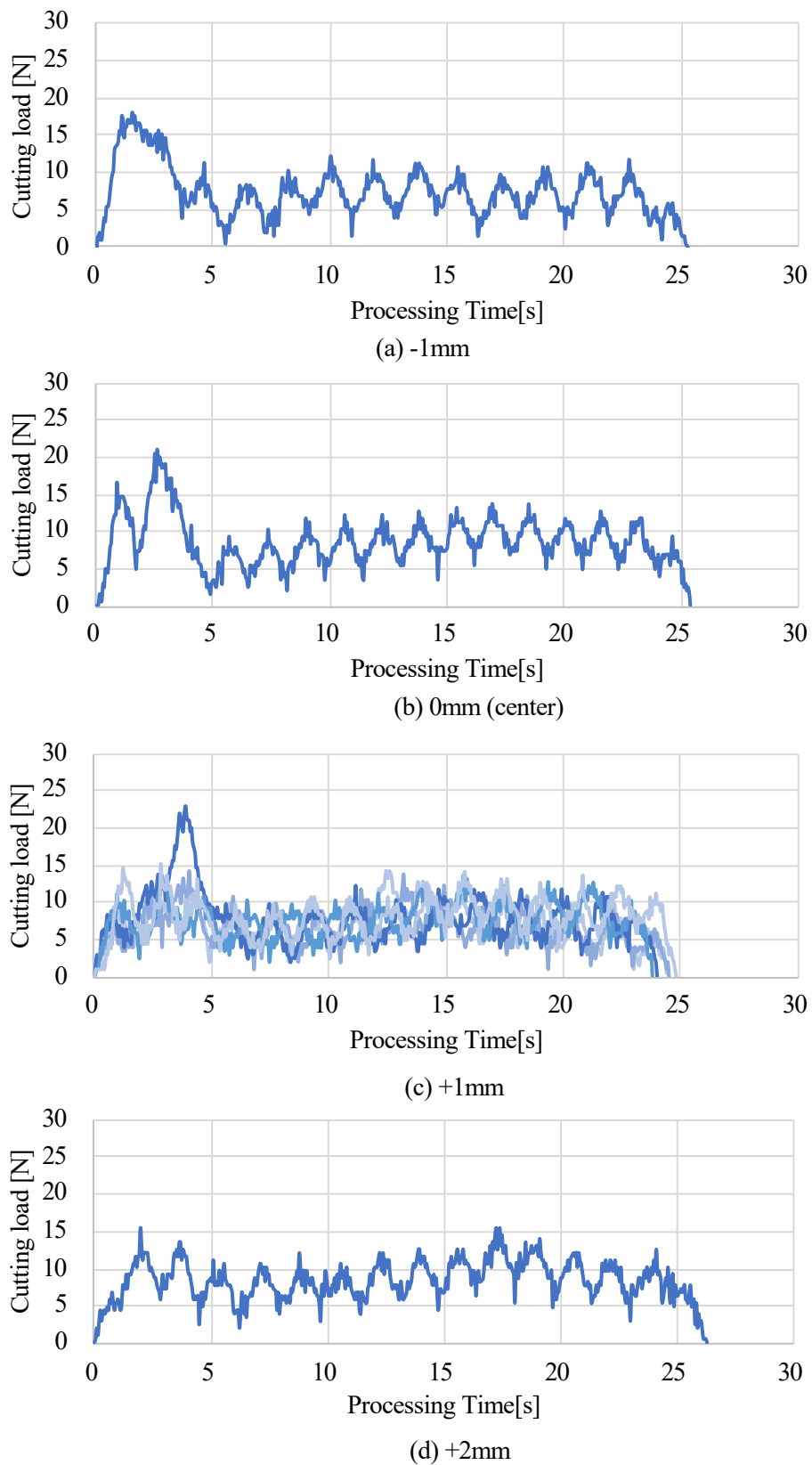
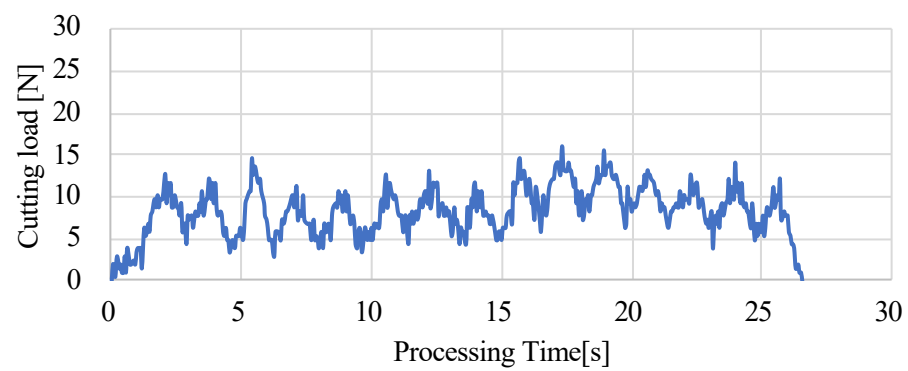
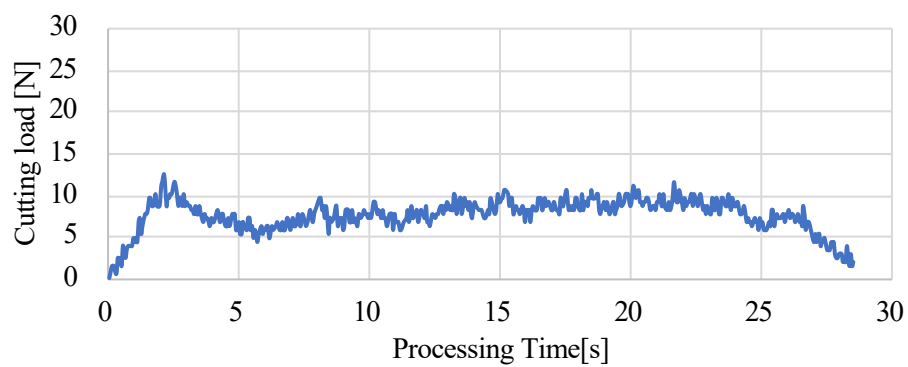


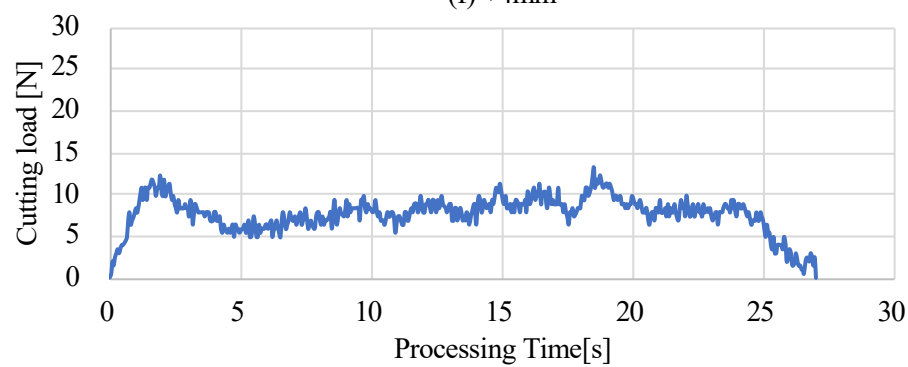
Fig.6.3 Comparison of cutting load by positioning of blade and roller (-1mm~+2mm)



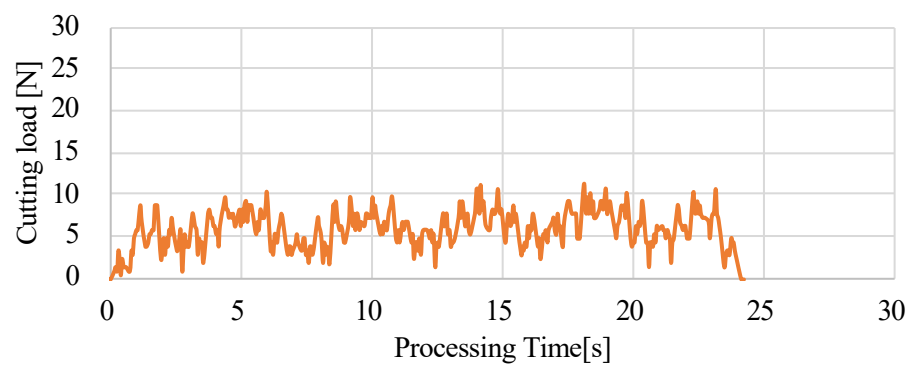
(e) +3mm



(f) +4mm



(g) +5mm



(h) Without roller

Fig.6.4 Comparison of cutting load by positioning of blade and roller (+3mm~+5mm)

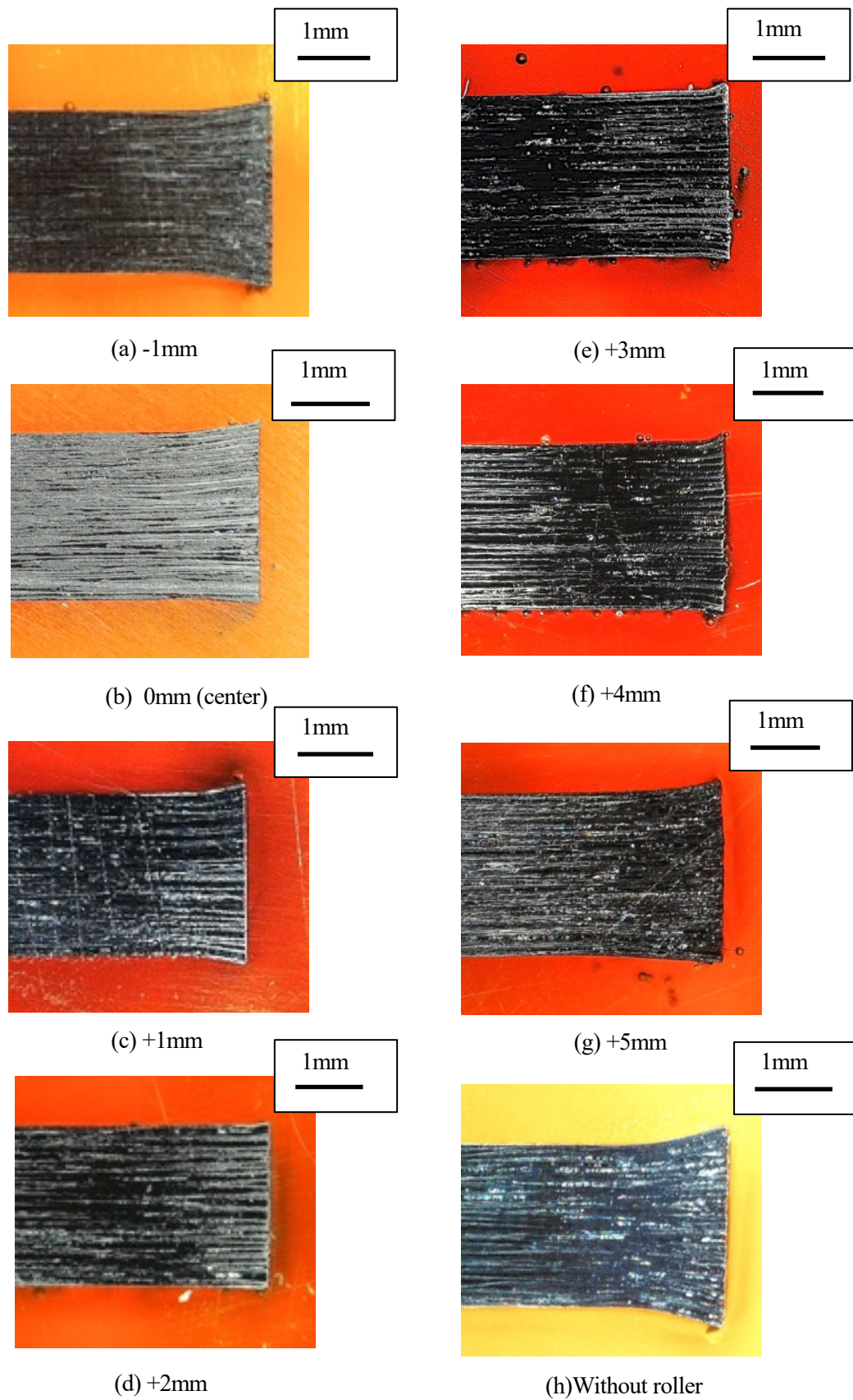


Fig.6.5 Typical image for each condition near the cut area

### 6.3 考察

本実験から、超音波カッターで切断し変形が生じた切断部近傍を、ローラーで挟み込むタイミングによって変形抑制の効果が変わることがわかった。特に、工具後端部（図 6.6 の赤線）とローラーが試験片と接する位置が一致している+2mm の条件において最も変形を減少できた。

-1mm から+2mm 範囲では、+2mm に近づくほど変形が小さくなった。これは、ローラー通過後も樹脂が軟化していることが原因だと推測する。図 6.7 の赤い四角の範囲のように-1mm, 0mm, 1mm において切断面がローラー通過後も刃に触れる時間があり、ローラーで挟み込んだ後に再度変形が生じていると考えられる。そのため、切断面がローラー通過後に超音波カッターの刃に触れている時間が短くなるほど変形が小さくなったと言える。

+2mm から+5mm 範囲では、+2mm に近づくほど変形が小さくなった。これは樹脂が硬化し始めていることが原因だと考えられる。図 6.8 のように+3mm 以降工具後端部とローラーが接する位置が離れており、ローラー通過時には樹脂が硬化し始めている。図 6.9 の切断部近傍の側面を見ると+4mm と+5mm は側面が粗くなっており、硬化し始めた部分を無理に押し戻したような形跡が残っている。これらのことから、切断部近傍の変形を減少させるには刃の通過直後に押し戻す必要があるとわかった。

また、切断荷重において-1mm, 0mm, +1mm において、図 6.10 の赤丸のような荷重の増加が見られた。これは 5.3 考察と同様に、ローラーが接したタイミングと荷重が増加し始めるタイミングが一致しているため、ローラーから試験片の熱が逃げることで荷重が増加していると考えられる。+2mm から+5mm の切断荷重において荷重の増加が見られなかったのは、図 6.11 のように切断位置とローラーが接する位置が遠くなり、ローラーの吸熱効果の影響を超音波カッターが受けなくなったと考えられる。+1mm の条件において荷重が増加する場合としない場合の 2 種類の結果を示したのもこの理由だといえる。

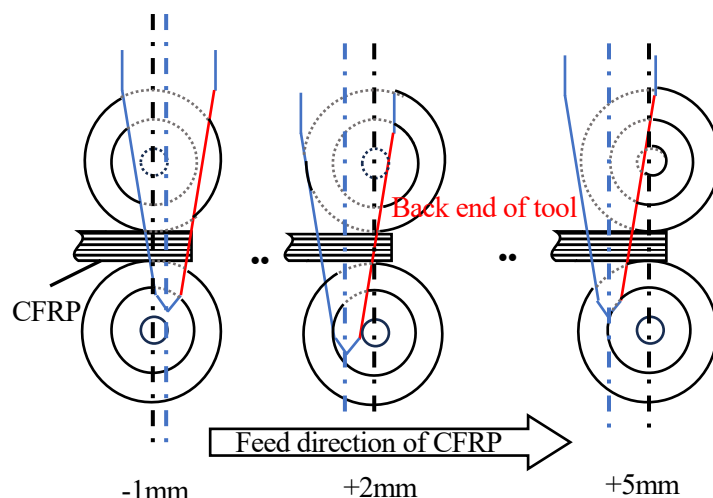


Fig.6.6 Processing for each condition

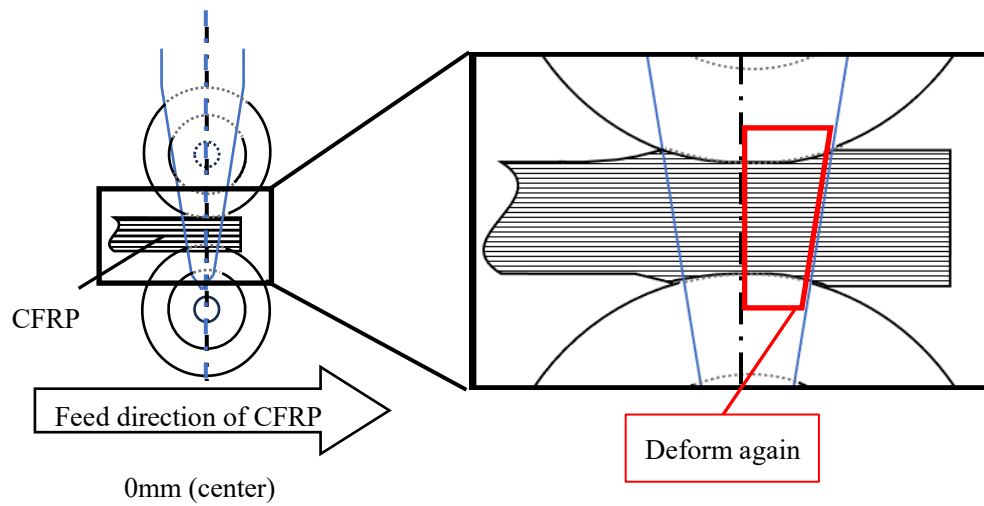


Fig.6.7 Deformed again after passing through rollers

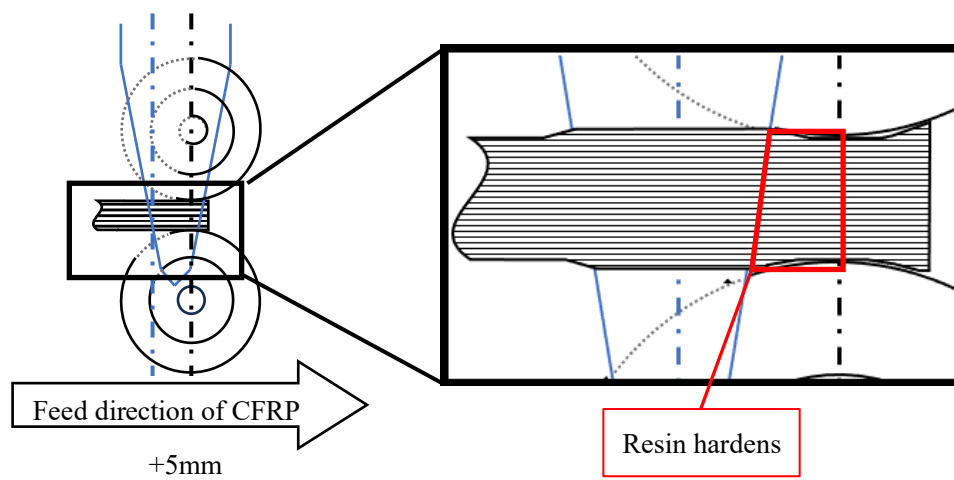


Fig.6.8 Resin hardens after blade passes through



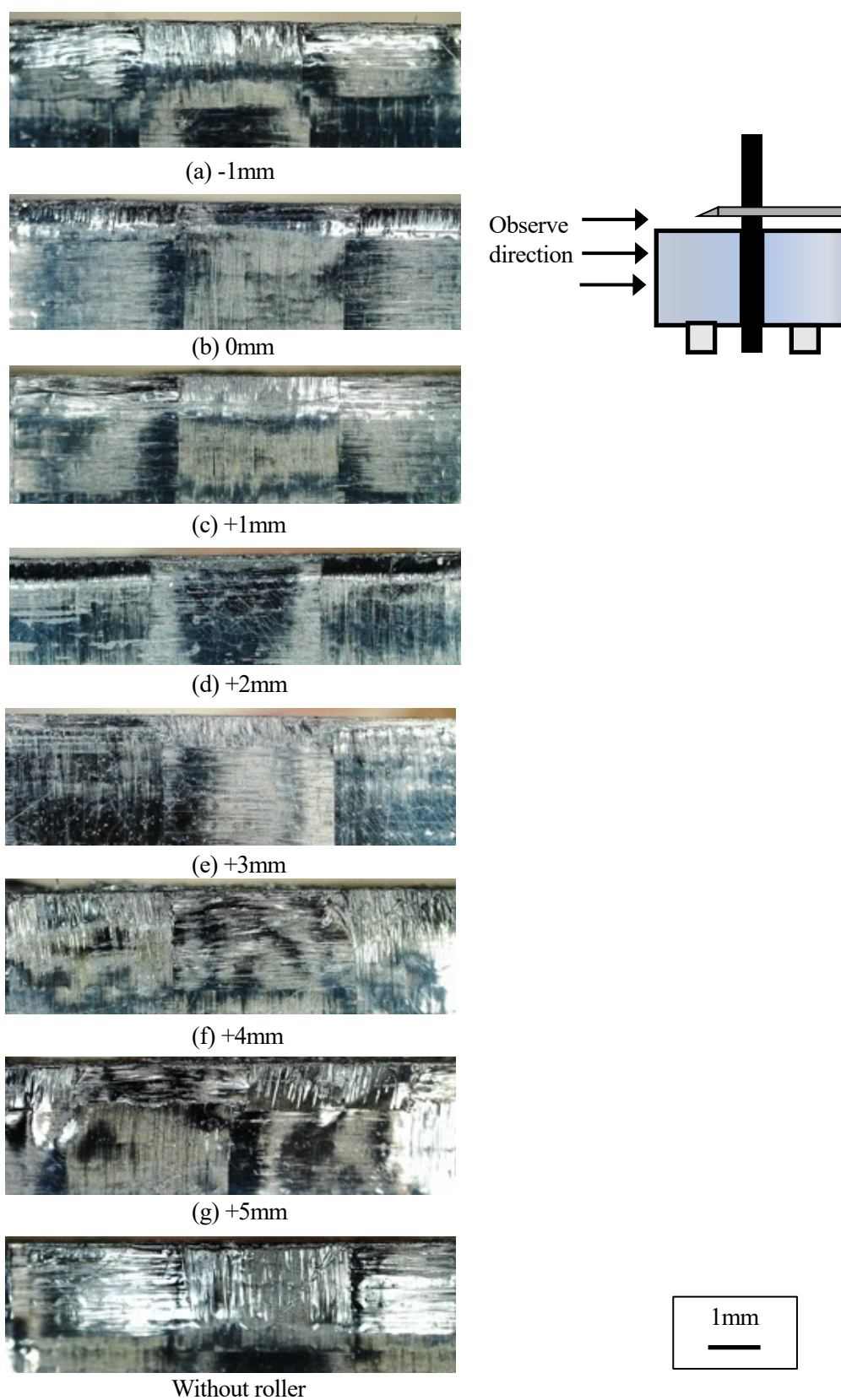


Fig.6.9 Side view near the cutting area



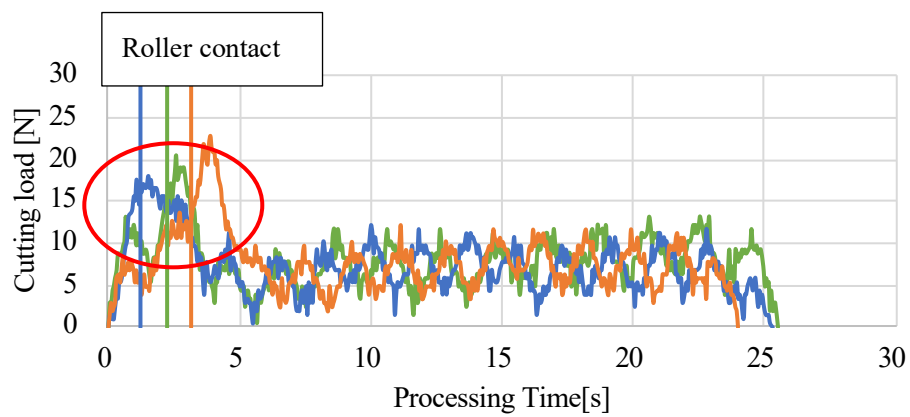


Fig.6.10 Position of roller contact and increased load (-1mm,0mm,+1mm)

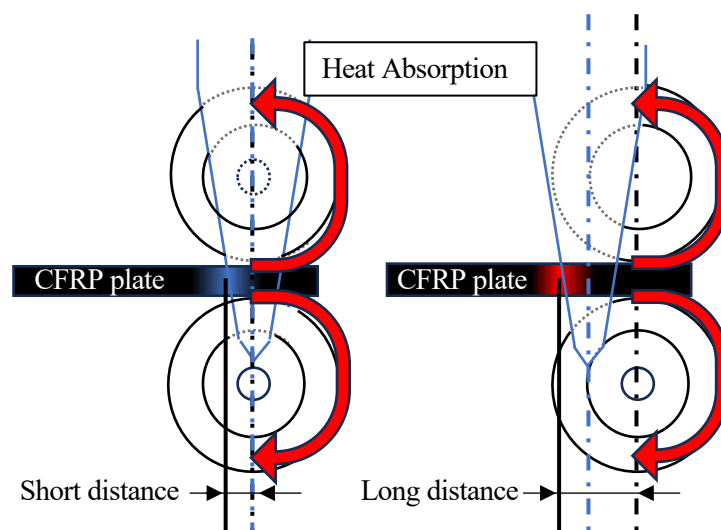


Fig.6.11 Effect of heat absorption on cutting load

## 7 結言

本研究では CFRP 材の超音波トリム加工時のローラーを用いた切断部近傍変形の抑制において、ローラーの材質及び切れ刃とローラーの位置関係に着目し実験を行った。ローラー材質の違いからは以下の知見(1)~(2)が得られた。切れ刃とローラーの位置関係からは以下の知見(3)~(4)が得られた。

- (1) 熱伝導率の高いジュラルミンローラーにおいて、ローラーなしの場合と比べて厚さ方向の変形が約 7 割小さくなり、影響長さも約 6 割小さくなった。
- (2) ローラーに熱伝導率の高い材質を用いることで、ローラー通過後に切断部近傍が十分に硬化し、押し戻した形状を維持できると考えられる。
- (3) 超音波カッターの刃が通過したと同時にローラーで押し戻す位置において、ローラーなしの場合と比べて厚さ方向の変形が約 8 割小さくなり、影響長さも約 8 割小さくなった。
- (4) 工具後端部が通過と同時にローラーで押し戻すことで、樹脂が硬化し始める前に押し戻し十分に变形抑制効果を得られたと考えられる。

## 参考文献

- 1) 小松 隆 『CFRPによる自動車設計入門』 日刊工業新聞社 2017
- 2) 東レ・カーボンマジック 『CFRPの基礎知識』  
<https://www.carbonmagic.com/cfrp/about.html>  
(参照 2024 年 1 月 16 日)
- 3) 平松 徹 『炭素繊維の本』 日刊工業新聞社 2012
- 4) 環境省 『カーボンニュートラルとは』  
[https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon\\_neutral/about/](https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/)  
(参照 2024 年 1 月 16 日)
- 5) 有澤秀彰 赤間知 二井谷春彦 『炭素繊維複合材料（CFRP）の高能率加工技術』  
三菱重工技報 Vol.49 No.3 (2012) 工作機械特集
- 6) 荻野 将広 『難削材：CFRP が工具刃先に及ぼす影響』
- 7) 株式会社ソノテック 『超音波カッターの原理』  
<https://www.sonotec.com/column/principle.html>  
(参照 2024 年 1 月 16 日)
- 8) 寺田 幸平 『炭素繊維強化プラスチック』 精密工学学会誌 Vol.81 No.6 2015

## 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 中西 栄徳 准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，終始親切丁寧なる御指導を賜りました 高橋 裕 教授に深く感謝致します．研究で使用する試験機製作を行うにあたって多くのご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いたします．そして，本論文をご査読いただきました 尾崎 仁志 助教に御礼申し上げます

最後に，幾多のご協力を頂きながら，ここにご指名を掲載できなかった方々に対し，その失礼とお詫びすると共に，謹んで御礼申し上げます．