

令和 2 年 6 月 20 日現在

機関番号：13701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14570

研究課題名(和文) ハイブリッド電着エンドミルによる炭素繊維強化プラスチックの高精密加工手法の開発

研究課題名(英文) Development of high precision machining method for CFRP with hybrid electroplated end-mill

研究代表者

古木 辰也 (Furuki, Tatsuya)

岐阜大学・工学部・助教

研究者番号：00783482

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：特に航空機で使用拡大が進む炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の外周加工で、高効率な粗加工と高精度な仕上げ加工を両立可能な新工具であるcBN電着エンドミルを開発するため、切れ刃形状や砥粒径を変化させた工具を試作し、その除去機構や特性を解明することで工具仕様の最適化を行った。本工具を容易に使用可能にするため、最適加工条件を導出するとともに、各加工条件が粗さや断面品質、温度に与える影響を統計的手法を用いて定量的に表す予測モデルを構築した。加工面粗さのさらなる改善を可能とする揺動研削法を適用した場合の粗さ予測モデルも構築した。本工具は自動車分野で使用が進む熱可塑性CFRPの高精度加工も可能である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の使用量は年々増加しており、CFRPの高効率・高精度加工の要求が高まっている。開発したcBN電着エンドミルは当該工具のみで従来工具から加工能率を落とすことなく、CFRPを加工するものであり、工具交換による非加工時間や工具コストの低下に寄与できる。一般的に研削加工は加工温度が上がりやすく、CFRP樹脂が変質しやすいが、当該工具はエンドミル形状としたことで、加工中のCFRP温度の上昇を抑制することができた。加工条件の決定は作業者の経験や感覚に依存しやすいが、当該工具を用いた際の表面粗さ予測式を構築したことで、所望する表面粗さを創成できる加工条件決定を容易にした。

研究成果の概要(英文)：In order to carry out the trimming for carbon fiber reinforced plastics (CFRP) with high efficiency and high accuracy, cBN electroplated end-mill that can do rough-cutting and finish grinding was developed. To develop this tool, the influences of cutting teeth shapes and abrasive diameter on machining results and characteristics were evaluated, and the removal mechanism and characteristics were unraveled. Moreover, the optimum machining condition was investigated and the estimation model for machined sectional shape quality, CFRP temperature and surface roughness were established. the estimation model for surface roughness when applying the oscillation grinding was also established, to further improve the surface roughness. The developed tool is also possible to precise machining of carbon fiber reinforced thermo plastics that has been required in the automobile field.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：CFRP 研削加工 電着エンドミル 研削温度 表面粗さ 加工条件設計 cBN工具 オシレーション研削

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は航空機分野にて使用量が急激に増加し、さらにその他の産業分野でも需要が増加している。急激な需要増加にともなって、CFRP の高能率・高精密な機械加工の必要性が高まっている。

CFRP の機械加工では、①良好な加工面の表面粗さ、②加工断面エッジ部のバリや未切断繊維の発生の抑制、③加工中の CFRP 温度がマトリクス樹脂のガラス転移温度以下であることが求められる。従来工具として、ダイヤモンドコーティング工具があるが②を十分に達成することが難しく、また当該工具が高コストである。研削砥石は①と②は達成できるが、CFRP 温度が上がりやすく③の達成が難しいという課題があった。以上より、①から③までの課題を達成できる新たな工具は CFRP の高能率・高精密加工に寄与できると考えられた。

### 2. 研究の目的

本研究では、1. 研究開始当初の背景で述べた 3 つの課題を解決するために、CFRP の粗加工と仕上げ加工を 1 本の工具で行うことが可能な、高能率加工が可能なエンドミル (切削工具) と高精密加工が可能な研削砥石を組み合わせたハイブリッド電着エンドミルを開発する。

### 3. 研究の方法

ハイブリッド電着エンドミルを開発するため、工具の形状および砥粒サイズが加工結果に与える影響の調査とそれらの最適化を行い、工具の仕様を決定した。さらに工具を試作し、加工条件が結果に与える影響を評価し、各加工条件が結果に与える影響を定量的に評価するとともに、最適加工条件を導出した。また、さらなる表面粗さの改善を目的に揺動研削 (オシレーション研削) 加工を適用した場合の表面粗さ予測モデルを構築した。

被削材である CFRP は約  $7\mu\text{m}$  の炭素繊維を使用した綾織プリプレグを 16 枚積層し、オートクレーブ成形により作製した。この CFRP は実際の航空機産業で使用されているものと同じである。成形後の板厚は  $5.8\text{mm}$  であった。この CFRP のマトリクス樹脂はエポキシであり、この樹脂のガラス転移温度は約  $200^\circ\text{C}$  である。

実験方法は、図 1 に示すように工作機械の一種である立形 3 軸制御マシニングセンタ NV4000 (森精機) の主軸に試作した工具を取り付けて、自転および走査することで加工試験を行う。測定対象は、加工中に CFRP に負荷される力 (研削抵抗)、CFRP 温度、加工後の CFRP の表面粗さ、加工断面エッジ部のバリや未切断繊維の長さである。それぞれの測定には、切削動力計 9347C (キスラー社)、赤外線サーモグラフィカメラ SC7000 (FLIR 社)、レーザ顕微鏡 OLS4100 (オリンパス)、光学顕微鏡 BX53M (オリンパス) である。サーモグラフィカメラで CFRP 温度を測定する際の CFRP の放射率は黒体塗料を用いた校正により、 $0.94$  とした。

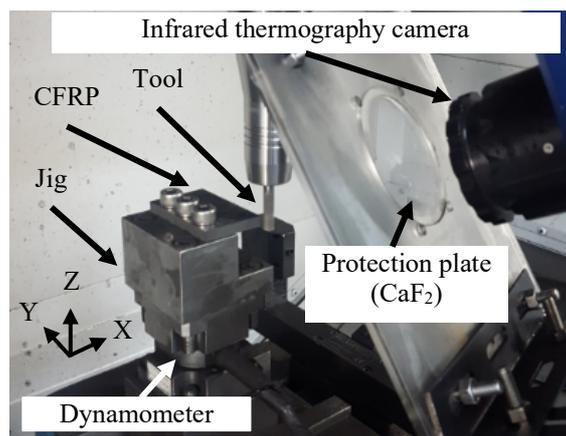


図 1 加工実験の外観図

### 4. 研究成果

図 2 に示すエンドミルのような形状を持つ超合金製の台金に耐摩耗性および耐熱温度の高い cBN 砥粒を電着固定した新工具である cBN 電着エンドミルを試作開発した。本工具は、マシニングセンタの主軸に取り付けて使用する。工具を正回転させたとき、工具のエンドミル形状の切れ刃が CFRP を高能率に除去する。このとき、加工断面エッジ部にバリや未切断繊維が生じるが、これは従来工具と同様である。次に工具を反時計回りに回転させた場合、工具の逃げ面に配置された cBN 砥粒が CFRP をわずかに研削除去することで、バリや未切断繊維のないシャープなエッジを創成する。

まず、工具台金の形状を決定するために、エンドミル形状における逃げ角が異なる工具 ( $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ) を試作した。切れ刃のすくい角とねじれ角は先行研究により、すくい角は  $+6^\circ$  においてエンドミル形状切れ刃による切削効果と工具外周の砥粒による研削効果を両立できることが判明しており、ねじれ角は  $10^\circ$  とすることでバリや未切断繊維が発生しにくいことが判明している。この際、試作工具の cBN 砥粒の粒径は、 $\#100$  (平均粒径:  $147\mu\text{m}$ ) とした。この逃げ角が異なる工具と従来からある丸棒台金の cBN 砥粒を電着した工具とを比較した。図 3 に CFRP 温度の測定結果、図 4 に加工断面の観察結果を示す。逃げ角が大きくなるにつれて CFRP 温度も上昇しているが、図 4 (a) からわかるように逃げ角が小さい工具や丸棒型工具の場合、加工面が隠れるためであると思われる。しかしながら、逃げ角が大きい工具でも、CFRP 温度はガラス転移温度以下の  $170^\circ\text{C}$  であり、温度抑制効果は高いといえる。断面観察の結果より、逃げ角が  $0^\circ$  のときにもっともバリや未切断繊維の長さは小さくなることがわかった。

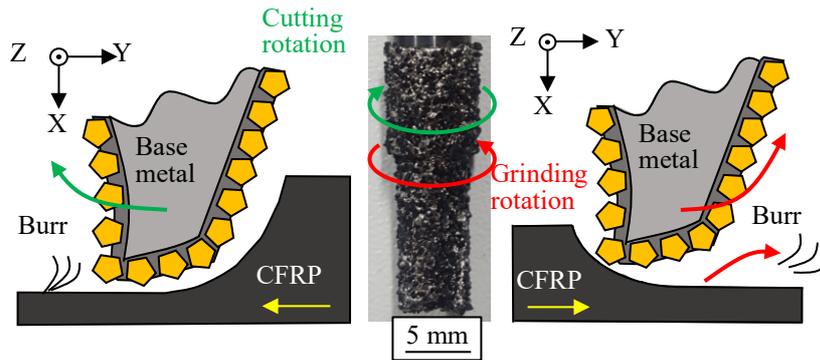
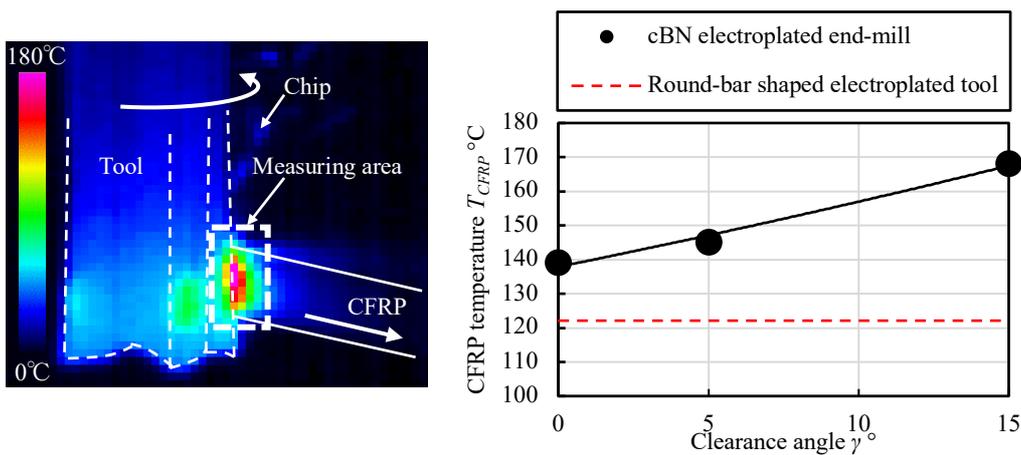


図2 cBN 電着エンドミルの外観と使用方法



(a) サーモカメラによる温度測定

(b) CFRP 温度の測定結果

図3 逃げ角が異なる開発工具と従来丸棒型電着砥石の CFRP 温度の比較

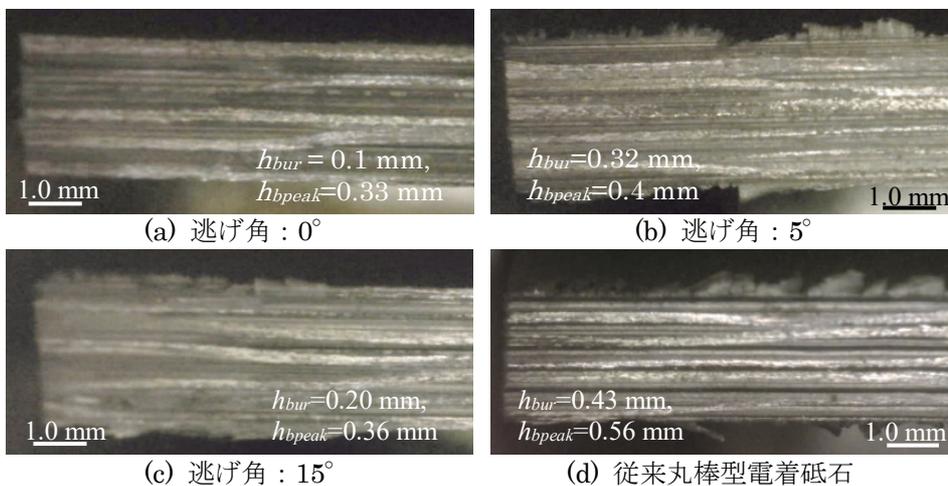


図4 逃げ角が異なる開発工具と従来丸棒型電着砥石の加工断面の比較

以上より、工具台金形状は、すくい角： $6^\circ$ 、ねじれ角： $10^\circ$ 、逃げ角： $0^\circ$ が良いことがわかったため、次に cBN 砥粒径の影響を調査した。また砥粒径は研削速度や送り量、切込み量の影響を受けると考え、これらの4因子を採用した実験計画法によって、それら因子が CFRP 温度等の結果に与える影響度および最適加工条件を導出した。実験計画法とは各因子の条件を直交表に割当て、各因子の影響度を定量的に評価するものである。本実験では4因子4条件を L25 直交表に割り当てた。各因子の設定条件は以下のとおりである。cBN 砥粒径 As： $\#30, \#60, \#100, \#200$ 、研削速度  $V$ ： $100, 120, 150, 200$  m/min、送り量  $f$ ： $2, 10, 25, 50$   $\mu\text{m}/\text{tooth}$ 、切込み量  $R_d$ ： $5, 10, 20, 30$   $\mu\text{m}$ 。本実験はトリミング（外周加工）であるため、軸方向切込み量は板厚（5.8 mm）である。砥粒径が異なるすべての試作工具で、従来の切削工具の推奨加工条件を用いて CFRP の切削試験を行ったが、すべての工具で工具表面の固定された砥粒が脱落することはなかった。また切削加工工程において、CFRP 温度は砥粒径が大きくなるにつれて上昇した。エッジ部のバリと未切断繊維は従来工具と同じように発生した。切削工程による樹脂の変質層やバリ、未切断

繊維の除去のための研削工程の試験を行った。図5に各因子が研削抵抗と CFRP 温度に与える影響を示す。まず研削抵抗と CFRP 温度には相関があることがわかった。砥粒径が小さくなる（メッシュサイズが大きくなる）ほど、研削抵抗と CFRP 温度は大きくなった。これは砥粒径が小さくなると砥粒間のチップポケットが狭くなるため、CFRP の微細な切りくずが堆積し、工具と CFRP 間の摩擦力が大きくなるためだと考えられる。送り量と切込み量が大きくなるにつれて研削抵抗と CFRP 温度も大きくなったが、これは一回転あたりの工具の仕事量が増えるためである。研削速度が大きくなるにつれて研削抵抗と CFRP 温度が大きくなった。これは工具と CFRP 間の除去速度や摩擦速度が大きくなったためと思われる。図6に各因子が未切断繊維と表面粗さに与える影響を示す。砥粒径が小さくなるほど未切断繊維長さは小さくなった。これは砥粒径が小さいほど、工具逃げ面側に固定された砥粒の数が増えることで、除去量が増えるためである。送り量と研削速度は未切断繊維と粗さに大きな影響を与えないことがわかった。切込み量が小さいほど未切断繊維の長さが小さくなった。これは切削工程で生じた未切断繊維の長さに対して切込み量が小さい場合に生じる。図7にすべての実験条件における、CFRP 温度と表面粗さの結果を示す。材料除去率 MRR が  $40 \text{ mm}^3/\text{min}$  を超える条件では CFRP 温度が極端に大きくなった。#30 の cBN 砥粒を使用した場合、表面粗さが極めて大きくなった。これらを不適切な条件とした結果を図8に示す。図8は研削時の主研削力  $F_n$ （砥石法線方向力）と送り分力  $F_t$ （砥石接線方向力）の比であり、この値が小さい方が加工中の CFRP を弾性変形させる力も小さいといえる。この結果より、実験番号12（砥粒径：#60、送り量： $50 \mu\text{m}/\text{tooth}$ 、切込み量： $20 \mu\text{m}$ 、研削速度： $100 \text{ m}/\text{min}$ ）が最適であることがわかった。また最適条件で加工を行ったが、ある結果が許容値を超えていた場合や砥石摩耗により許容値を超過した場合には、図5、6の結果を参考に加工条件を修正すれば良い。導出した最適条件による加工断面と従来のダイヤモンドコーティングエンドミルによる加工断面の比較を図9に示す。従来工具ではエッジ部

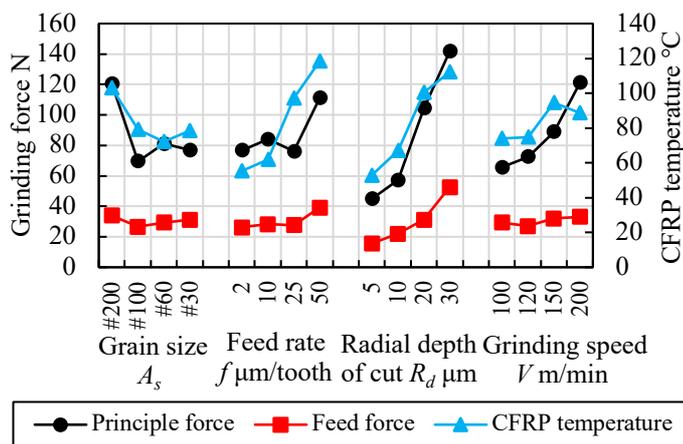


図5 各因子が研削抵抗と CFRP 温度に与える影響

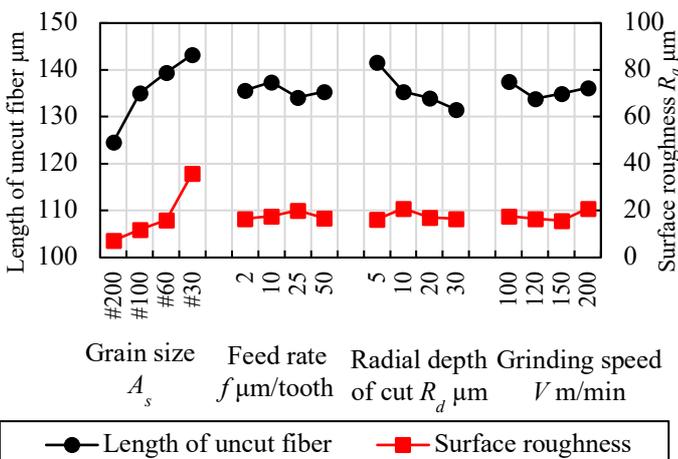


図6 各因子が未切断繊維長さと表面粗さに与える影響

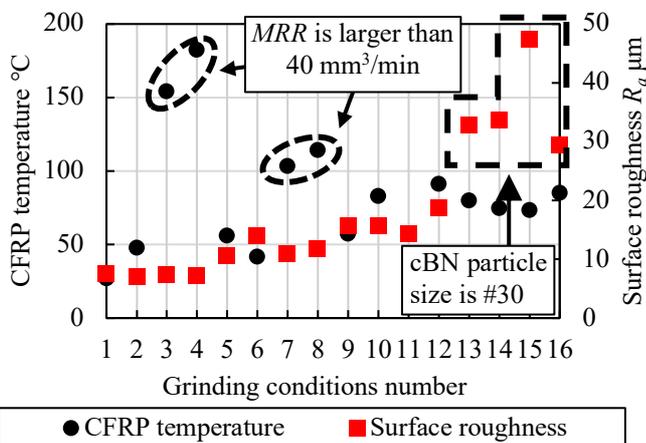


図7 各切削条件での CFRP 温度と表面粗さ

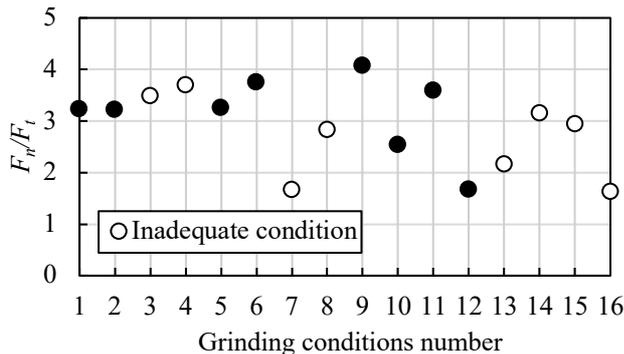


図8 各切削条件での切削力の比

にサブ mm オーダの複数の未切断繊維が発生しているが、導出条件を使用したハイブリッド電着エンドミルではシャープなエッジを創成できていることがわかった。図 4 (d) の従来砥石に対しても同様である。しかしながら、工具軸方向 (図 9 においては垂直方向) の表面粗さが  $18.7 \mu\text{m}$  と大きいという課題が残った。

表面粗さをさらに改善するために、工具を工具軸方向と送り方向に揺動させながら加工するオシレーション研削を適用した。オシレーション研削により、CFRP 単位面積あたりに作用する砥粒数が増加するため、表面粗さが改善される。このオシレーション研削における設定パラメータを図 10 に示す。設定パラメータは工具揺動周期  $T$ 、振幅  $A_m$  である。また、 $D$  は工具径、 $l_f$  は逃げ面幅、 $\theta$  は工具回転角度である。幾何学的に求めたオシレーション研削における最大高さ粗さの予測式は式 (1)、式 (1) を算術平均粗さに変換するには図 11 より両者の粗さには相関がため、式 (2) を用いる。

$$Rztc = \frac{\pi D}{2l_f} Rzt \quad (1)$$

$$Ra = \frac{Rz - 14.4}{4.61} \quad (2)$$

この構築した予測式による算術平均粗さと実際に CFRP をオシレーション研削して得た算術平均粗さを図 12 に示す。図 12 で  $\eta$  とは以下の式 (3) であらわされる。

$$\eta = \tan^{-1} \left( \frac{2A_m}{T} \right) \quad (3)$$

つまり  $\eta$  が  $90^\circ$  に近いとき、工具は Y 方向にほとんど進まず、Z 方向に大きく走査される。図 12 より、 $\eta$  が  $89^\circ$  を超えると実測値が予測値から乖離している。これはマシニングセンタの送り軸を同時 2 軸制御する際に、Z 方向の移動量と比べて Y 方向移動量が極めて小さいため、まず Z 方向にのみ工具が動き、Z 方向の終了地点まで工具が移動した後に Y 方向への走査が行われているためであった。一方で  $\eta$  が  $90^\circ$  に極めて近い場合には、表面粗さは予測値と等しい。これは  $\eta$  が  $89^\circ$  に近いときと同様に工具はまず Z 方向に移動し、その後 Y 方向に走査されるが、 $\eta$  が  $90^\circ$  に近いときは揺動周期  $T$  が極めて小さいため、結果として表面粗さは小さくなった。つまり本実験で使用したマシニングセンタの運動精度による誤差であることがわかり、構築した予測モデルはオシレーション研削における表面粗さをよく予測できていることがわかった。

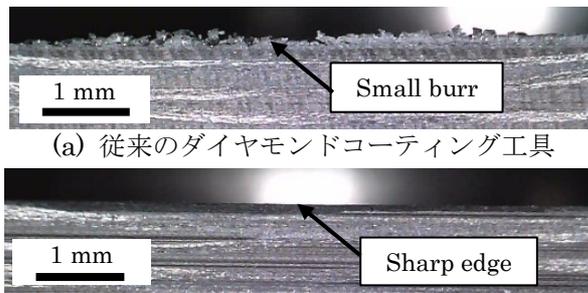


図 9 従来工具と開発工具の加工面比較

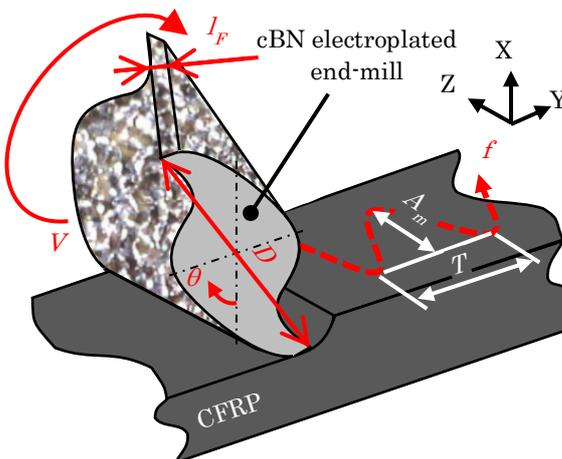


図 10 オシレーション研削の模式図とパラメータ

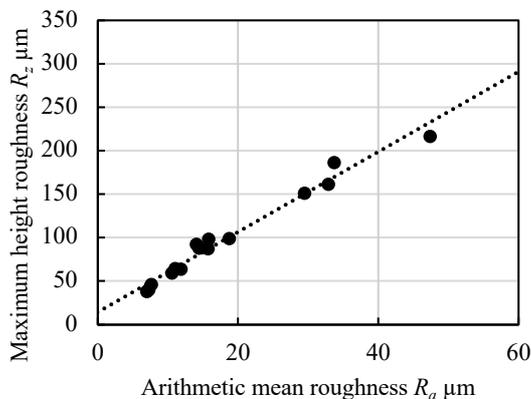


図 11 最大高さ粗さと算術平均粗さの関係

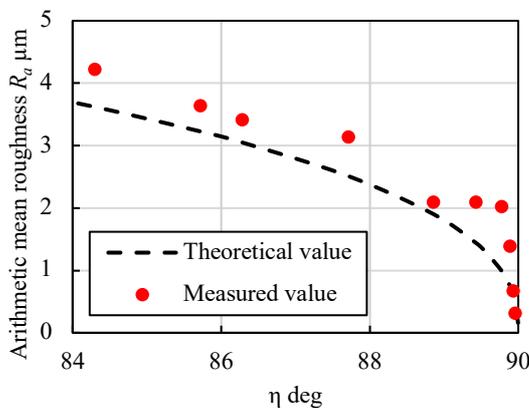


図 12 オシレーション研削における粗さ予測結果と実際の表面粗さの比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tatsuya Furuki, Yugo Kabaya, Toshiki Hirogaki, Eiichi Aoyama, Kiyofumi Inaba and Kazuna Fujiwara	4. 巻 8
2. 論文標題 Development of cBN electroplated end-mill combined cutting and grinding for precision machining of CFRP	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Abrasive Technology	6. 最初と最後の頁 188-202
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 山下真之介, 古木辰也, 上坂裕之, 稲葉清文, 藤原和納
2. 発表標題 CFRP加工用cBN電着エンドミルの加工条件の最適化
3. 学会等名 砥粒加工学会先進テクノフェア
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuya Furuki, Yugo Kabaya, Toshiki Hirogaki, Eiichi Aoyama, Kiyofumi Inaba and Kazuna Fujiwara
2. 発表標題 Development of cBN electroplated end-mill combined cutting and grinding for precision machining of CFRP
3. 学会等名 The 20th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 米谷瑠里子, 廣垣俊樹, 青山栄一, 古木辰也, 稲葉清文, 藤原和納
2. 発表標題 CBN電着エンドミル工具を用いたCFRP側面切削時の現象の考察
3. 学会等名 2017年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tatsuya Furuki, Shinnosuke Yamashita, Toshiki Hirogaki, Eiichi Aoyama, Ruriko Kometani, Kiyofumi Inaba and Kazuna Fujiwara
2. 発表標題 Investigation on optimum abrasive size of cBN electroplated end-mill for CFRP machining
3. 学会等名 euspen 19th International Conference and Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinnosuke Yamashita, Tatsuya Furuki, Hiroyuki Kousaka, Kiyofumi Inaba and Kazuna Fujiwara
2. 発表標題 Investigation of Optimum Grinding condition using cBN Electroplated End-mill for CFRP Machining
3. 学会等名 The 22nd International Symposium On Advances in Abrasive Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山下真之介, 古木辰也, 上坂裕之, 稲葉清文, 藤原和納
2. 発表標題 CFRPの高精密加工を実現するcBN電着エンドミルの開発と最適加工条件の導出
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----