

平成 27 年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「CFRP に対する切れ刃自己再研磨機能を備えた超音波切断技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成 28 年 3 月

担当局 関東経済産業局
補助事業者 公益財団法人群馬県産業支援機構

目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	
1-2 研究体制	
(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	
1-3 成果概要	
1-4 当該研究開発の連絡窓口	
第2章 本論	4
・CFRPを良好に切断可能、且つ再研磨使用可能な切れ刃開発	
・短時間再研磨方法の開発	
・再研磨タイミングのデータベース構築	
第3章 全体総括	11

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的・目標

(1) 研究背景

CFRP系新素材は、機械加工における刃物寿命が極端に短い等、成形後の二次加工技術が確立されていない。本研究開発では、当社コア技術の超音波加工技術と多関節ロボット技術を基礎に、刃物をロボットから取り外す事無く再研磨する技術を開発し、刃物寿命を格段に向上、CFRPの二次加工を網羅的に可能とする加工技術を開発した。中小ものづくり高度化法及び中小ものづくり高度化指針との関連は下記のとおりである。

三) 精密加工に係る技術に関する事項

1 精密加工に係る技術において達成すべき高度化目標

(4) 川下分野特有の事項

3) 航空宇宙分野に関する事項

①川下製造業者等の特有の課題及びニーズ

ウ. 軽量化、ネットシェイプ化

エ. 燃費向上

4) その他の川下分野に関する事項

a.自動車分野に関する事項

①川下製造業者等の特有の課題及びニーズ

イ. 軽量化

ウ. 複雑形状化・一体加工化

エ. 燃費向上

(2) 研究目的及び目標

研究目的

CFRP系新素材は、成形後の二次加工が必須である。しかし、従来の機械加工では刃物寿命が極端に短い等、加工技術が確立されていない。これが、CFRPの本格的な実用化への大きな課題となっている。本研究開発では、当社コア技術の超音波加工技術と多関節ロボット技術を基礎に、刃物をロボットから取り外す事無く再研磨する技術を開発し、刃物寿命を格段に向上させる。以て、CFRPに対する二次加工を網羅的に可能とする加工技術を開発する。中小ものづくり高度化法及び中小ものづくり高度化指針との関連は下記のとおりである。

3) 航空宇宙分野に関する事項

②高度化目標

エ. 新材料(CFRP等)加工対応

4) その他の川下分野に関する事項

a.自動車分野に関する事項

②高度化目標

イ. 複雑三次元形状等を創成する加工技術及び一体加工技術の構築

ウ. 難加工材・新材料加工対応

目 標

【1.CFRPを良好に切断可能、且つ再研磨使用可能な切れ刃開発】

加工実験装置の開発と、刃先の微細な形状の最適化確立。

開発した刃物で加工速度 6m/min (被加工物の厚さ t0.3mm) の達成。

【2.短時間再研磨方法の開発】

【2-1.再研磨方法開発】

刃物の再研磨 20 回利用、再研磨時間 1 分以内。

【2-2.加工状態評価技術開発】

加工状態を定量的に評価する技術開発。

【3.再研磨タイミングのデータベース構築】

再研磨タイミングのデータベース構築。

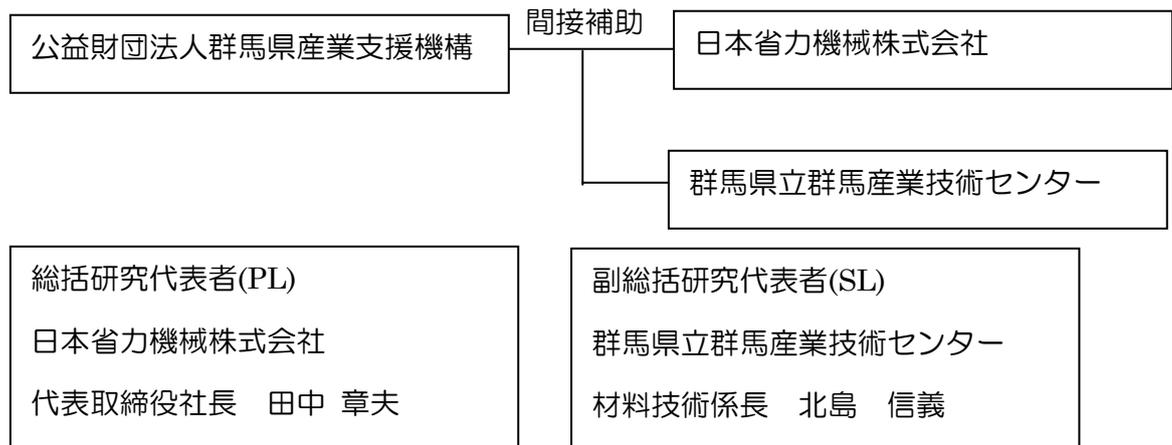
(3) 実施結果

- 18m/min の切断が可能レベルに達した。また、被切断物の厚みも、当初 t0.3mm 程度を狙ったが、その3倍の t0.9mm まで切断可能に至った。
- 刃物の20回の再研磨利用、再研磨時間1分以内の目標を達成した。
- ワーク加工状態を定量評価する技術を確立した。
- 再研磨が必要となる加工履歴と再研磨条件のデータベース構築を行った。
- 被加工物の切断において認められる加工不具合の原因として、少なくとも二つの原因が認められた。すなわち切れ刃への被加工物に含まれる樹脂の付着、超硬合金製切れ刃の表面に含まれる元素であるコバルト量の低下である。
- 切れ刃の振動数を適宜計測することは、CFRPの超音波切断技術において重要であり、本事業では、簡易的光学系を含む計測器を開発し切れ刃の周波数を計測できることを確認した。

1-2 研究体制

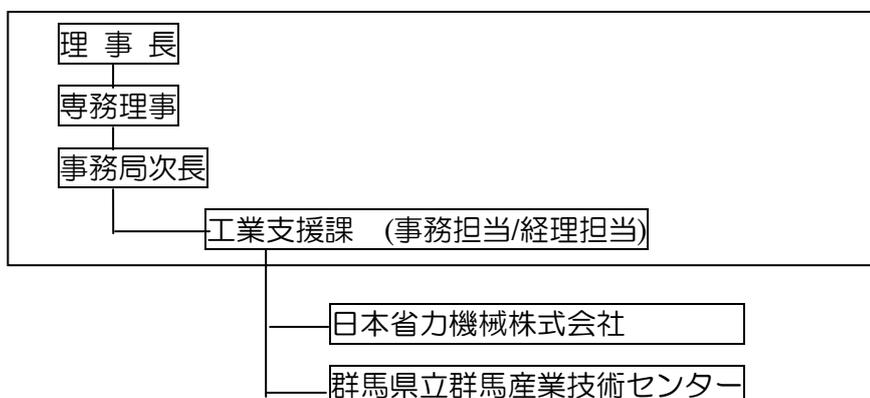
(1) 研究組織・管理体制

1) 研究組織(全体)



2) 管理体制

事業管理機関（補助事業者）公益財団法人群馬県産業支援機構



(2) 研究者氏名

事業管理機関（補助事業者）公益財団法人群馬県産業支援機構

氏名	所属・役職	実施内容
田口恭二	工業支援課長	管理員
富山勝敏	工業支援課主幹	管理員
石崎祐史	工業支援課主任	経理担当者

研究実施期間（間接補助先）

日本省力機械株式会社

氏名	所属・役職	実施内容
高岡 武史	グローバル開発センター 技術	2-2、3
廣町 遼	技術部 開発設計課	1、2-1
佐藤 令季	設計技術	2-2、3
渡辺 良幸	技術課長	1、2-1、2-2、3
桜井 正斗	グローバル開発センター 技術	1、2-1、2-2、3
田中 章夫	代表取締役社長	1、2、3

群馬県立群馬産業技術センター

氏名	所属・役職	実施内容
田島 創	群馬県立群馬産業技術センター・独立研究員	1、2-1
北島 信義	群馬県立群馬産業技術センター・材料技術係長	1、2-1

(3) 協力者

アドバイザー

氏名	主な指導・協力内容
磯部浩巳	超音波振動及び超音波加工に関する技術指導及び協力をする。
長岡 猛	複合材の成形及び成形機に関する高度な知見があり、技術指導及び協力をする。
山口 泰弘	複合素材に関する高度な知見があり、複合材加工についての技術指導及び協力をする。

1-3 成果概要

【1.CFRP を良好に切断可能、且つ再研磨使用可能な切れ刃開発】

目標の加工速度 6m/min (t0.3mm) に対して、加工速度 18 m/min が可能となった。被切断物の厚みは、目標値の 3 倍の t0.9mm まで切断可能であることが確認された。

【2.短時間再研磨方法の開発】

【2-1. 再研磨方法開発】

刃物の再研磨 20 回を達成した。再研磨時間は、目標処理速度の 1/3 の 20 秒程度を達成した。

【2-2. 加工状態評価技術開発】

様々な加工速度で加工抵抗を定量化できる評価装置を開発製作した。

【3.再研磨タイミングのデータベース構築】

当初の想定と異なる現象として、超硬合金製の刃物で熱硬化性 CFRP を切断する時、

刃物のチッピングが偶発的且つ頻繁に発生するという現象が生じた。この現象への対策として、刃物を鈍角化することでチッピングの発生を抑制することに成功した。再研磨条件の蓄積については、上記の対策に時間を要したが3種の刃物データの蓄積に成功した。今後は鈍角化した刃物をどこまでチッピングを防ぎながら鋭角化できるかが課題となる。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

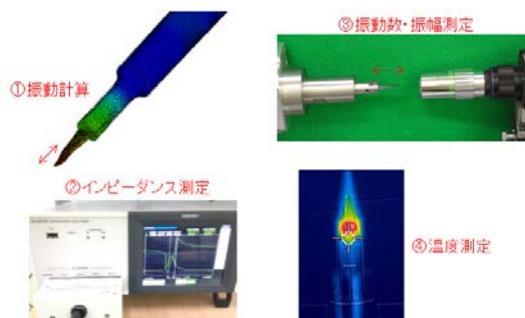
公益財団法人群馬県産業支援機構 富山勝敏 027-255-6501
tomiyaama@g-inf.or.jp

第2章 本論

【1.CFRPを良好に切断可能、且つ再研磨使用可能な切れ刃開発】

(1) 専用加工装置開発

ロボットに搭載したまま自動研磨するための専用加工装置を開発した。超音波カッターを適切な振動数で振動させる為に、①形状振動特性の計算、②インピーダンス測定、③レーザードップラ振動計による変位測定、④非接触温度計を用いながら刃物の設計製作を行った。



(2) 切れ刃及び被加工物の状態観察

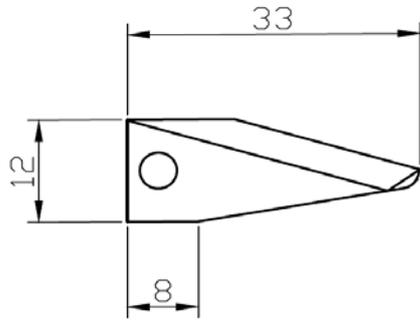
CFRPの切断加工を行った切れ刃について、被加工物切断面の観察、切れ刃の観察、及び切れ刃への付着物の分析を行った。被加工物切断面及び切れ刃の観察には、キーエンス社製マイクロSCOPE VHX-500、CCDカメラを搭載したレーザー微細加工システム（群馬産業技術センター既設装置）、電子顕微鏡（日本電子株式会社製 走査型電子顕微鏡 JSM-5600LV）、及び X線マイクロアナライザー（島津製作所社製 EPMA-1600）を用いた。切れ刃への付着物及び被加工物切断面の分析には、赤外分光分析装置として、ThermoFisher Scientific社製フーリエ変換赤外分光分析装置 Magna-750及び赤外顕微鏡 Nic-Planを用いた。切れ刃は、下図に記載の②及び④を用いた。

X線マイクロアナライザー分析及び電子顕微鏡撮影では、切れ刃をアルミ製の台座にカーボンテープを用いて固定した。分析の結果、測定部位とカーボンテープの位置が1 mm以上離れている事からその影響がないと仮定し、得られた結果について半定量分析を行った。

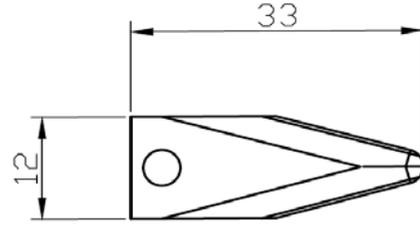
(3) 加工不具合の原因の特定（再研磨を要する切れ刃の状態確認と再研磨切れ刃の状態確認）

刃厚、刃ピッチ、刃高、そして被加工物の厚さの測定には、マイクロSCOPE及び電子顕微鏡を用いた。切れ刃への付着物の除去及び刃こぼれの改善（再研磨）のために、日本省力機械株式会社で開発した切れ刃自己再研磨機を用いた。

①

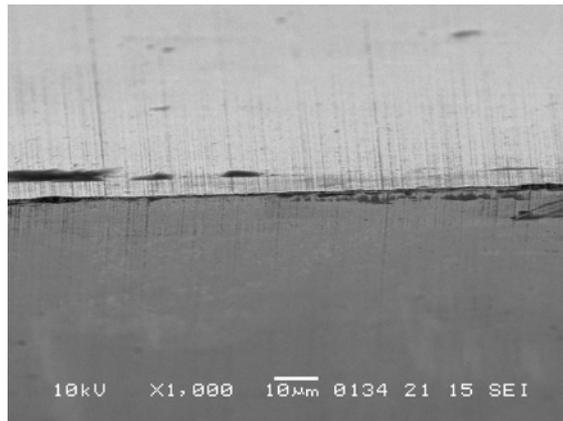


②



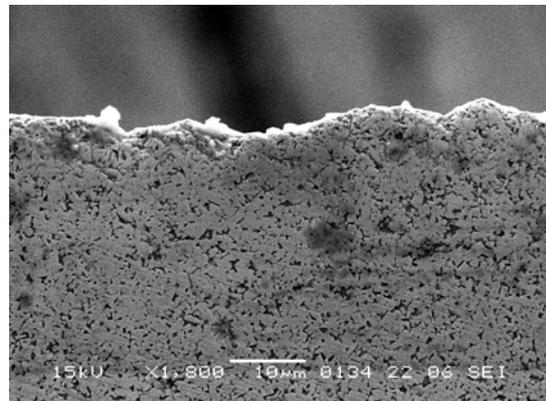
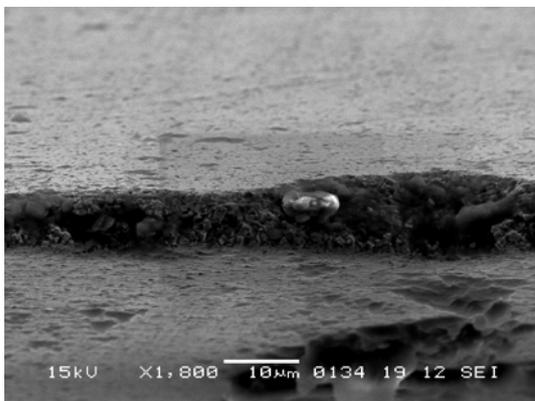
本研究開発で利用される切れ刃の形状

CFRP の加工用切れ刃について、表面の観察を行った。使用前の切れ刃②の電子顕微鏡撮影の結果（写真）を以下に示す。



使用前の切れ刃②の観察画像。刃先正面から撮影。（倍率:1000倍）。

また、使用後の切れ刃②の電子顕微鏡撮影の結果（写真）は以下のとおりである。



使用後の切れ刃②の観察画像。刃先側面から撮影。（倍率：1800倍）。

電子顕微鏡撮影の結果から、刃先付近は、きれいな形状をしており、刃厚は約 1～2 μm 程度であることが確認された。一方、使用後の切れ刃②の電子顕微鏡撮影の結果から、刃先の表面は平ら（チップングのような現象は確認されない）であるが、多くの窪み（黒い部分）の存在が確認された。このような刃先の変化は、刃先を構成している物質の変化によることが推測されたため、X 線マイクロアナライザーによる表面の分析を行った。

下図に使用後の切れ刃②に対して行われた X 線マイクロアナライザーによる分析の結果を示す。また、切れ刃（使用前）、切れ刃（使用後）、及び切れ刃（使用後）を 2000 番の砥石で再研磨した後に測定された X 線マイクロアナライザー分析により認められた元素の一覧と重量割合を表 1 に示す。

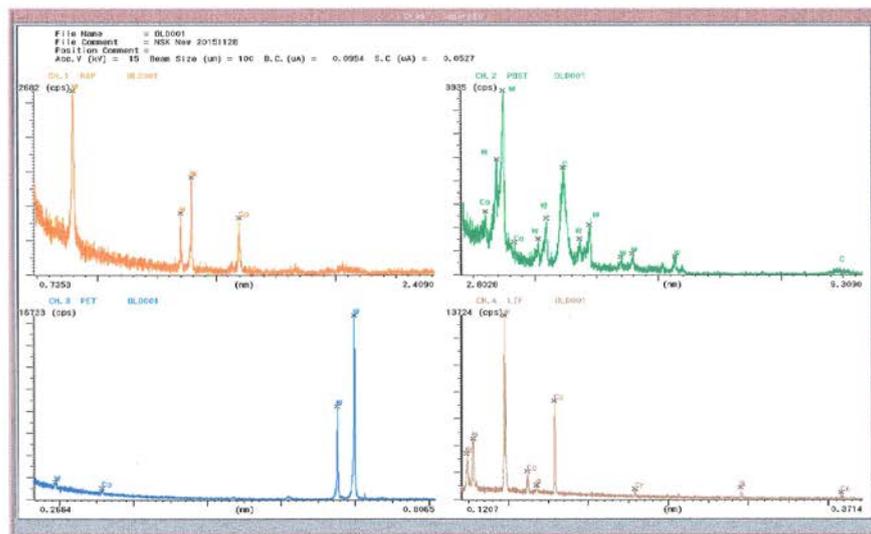


図 X 線マイクロアナライザー分析の結果、得られた X 線スペクトル。(使用後の切れ刃②)。

表1 X 線マイクロアナライザー分析の結果¹⁾。

元素	切れ刃②（使用前） の割合 wt%	切れ刃②（使用後） wt%	砥石（2000 番）、 4000rpm にて再研 磨した切れ刃② wt%
タングステン (W)	84.2	86.1	83.4
コバルト(Co)	12.1	9.8	11.9
炭素(C)	3.0	3.4	3.4
クロム(Cr)	0.7	0.7	1.3

1) 測定範囲φ100μm.

X 線マイクロアナライザー分析の結果、使用後の切れ刃②では、コバルトの割合は 9.8 wt% であり、使用前の切れ刃②の 12.1 wt% に比べ低下していることが確認された。この結果から、使用後の切れ刃表面の窪みは、超硬合金の構成元素であるコバルトの切れ刃表面からの欠落が原因であることが示唆された。

切れ刃に用いられた超硬合金の構成元素は、コバルトを中間子としたタングステン

カーバイト(W+C)である。これは、タングステンカーバイトが 1400℃の高温でも溶融することがなく、コバルトのような中間子を用いることによりタングステンカーバイトを固定・安定化できるためである。一方、タングステンカーバイトを主材とした超合金が摺動部品として用いられる場合、その強度や硬度から想定される寿命より極端に早く摩耗、損傷することが指摘されている。この原因として挙げられるのが腐食や摺動摩耗、クラックの発生などである。本研究において確認された使用後の切れ刃のコバルトの欠落は、CFRP を切断する際に生じる CFRP と切れ刃の摺動摩耗によることが推測された。この現象は、被加工物の切れ刃への付着による切れ刃の割れと併せて注意が必要と考える。

【2.短時間再研磨方法の開発】

【2-1.研磨方法開発】

(1) 再研磨の最適化

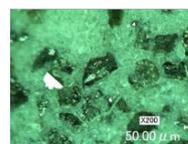
6 軸多関節ロボット及び自動研磨機から構成される専用加工実験機を製作した。この実験機を用い、送り速度、角度、押付力をロボット側で制御し、研究を行った。砥石種類、砥石粗さ、回転速度、回転方向を研磨機側での制御により最適条件の再研磨刃物を作製した。作製した刃物の形状測定は、加工状態評価装置内の形状測定器で 3次元データを作成して、この 3次元データを基に測定した。再研磨条件選定後は 6 軸制御多関節ロボットに保持させた切れ刃を小型研磨機の砥石で研磨することで目標回数と時間以内での自動研磨を試みた。

再研磨条件は、太さ 8 μ m の炭素繊維の切断を目標にしたときに最適と思われる「波刃」を構成する条件を目標とした。刃高 (10 μ m)、刃ピッチ (20 μ m)、刃幅 (10 μ m) の形状になるよう砥石の種類、粗さ、回転速度、押付力、送り速度、刃物角度を変化させ最適な研磨条件を選定した。

当初砥石は粒度の粗い番手を使用する予定であったが、研磨量が多くなり再研磨回数の目標が到達困難であったため、加工量の制御が可能な粒度の細かな番手に変更した。



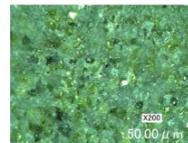
Φ100径 回転砥石



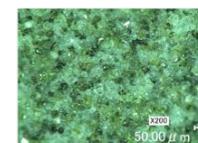
粗さ#60



粗さ#120



粗さ#180



粗さ#240



粗さ#2000



粗さ#3000

砥石：ダイヤモンド砥石
 砥粒：#60～#3000
 結合材：ビドリファイド

(2) 再研磨後の切れ刃の状態観察

CFRP 超音波切断加工において認められた切れ刃の不具合が、再研磨により改善されるかを確認するため、再研磨後の超合金切れ刃の状態を観察・分析した。また、超音波加工用切れ刃の実際の動きや周波数を確認するための光学分析器を構築し、切れ刃の周波数を測定した。

下図に CFRP 加工後に再研磨した切れ刃の電子顕微鏡撮影の結果を示す。再研磨を行う事により、切れ刃表面の窪みが低減し、新しい刃先の構成が確認できた。また、再研磨の条件として、砥石の番手や回転数により、構成される刃先の形状を制御することができた。被加工物に適した再研磨方法を適宜選択できる事が確認された。

上記表 1 に再研磨により構成された新しい刃先に対する X 線マイクロアナライザー分析の結果を示す。この結果から、使用後の切れ刃において認められたコバルト量の低下が改善され、構成元素の重量割合が使用前の切れ刃に近づいていることが確認された。

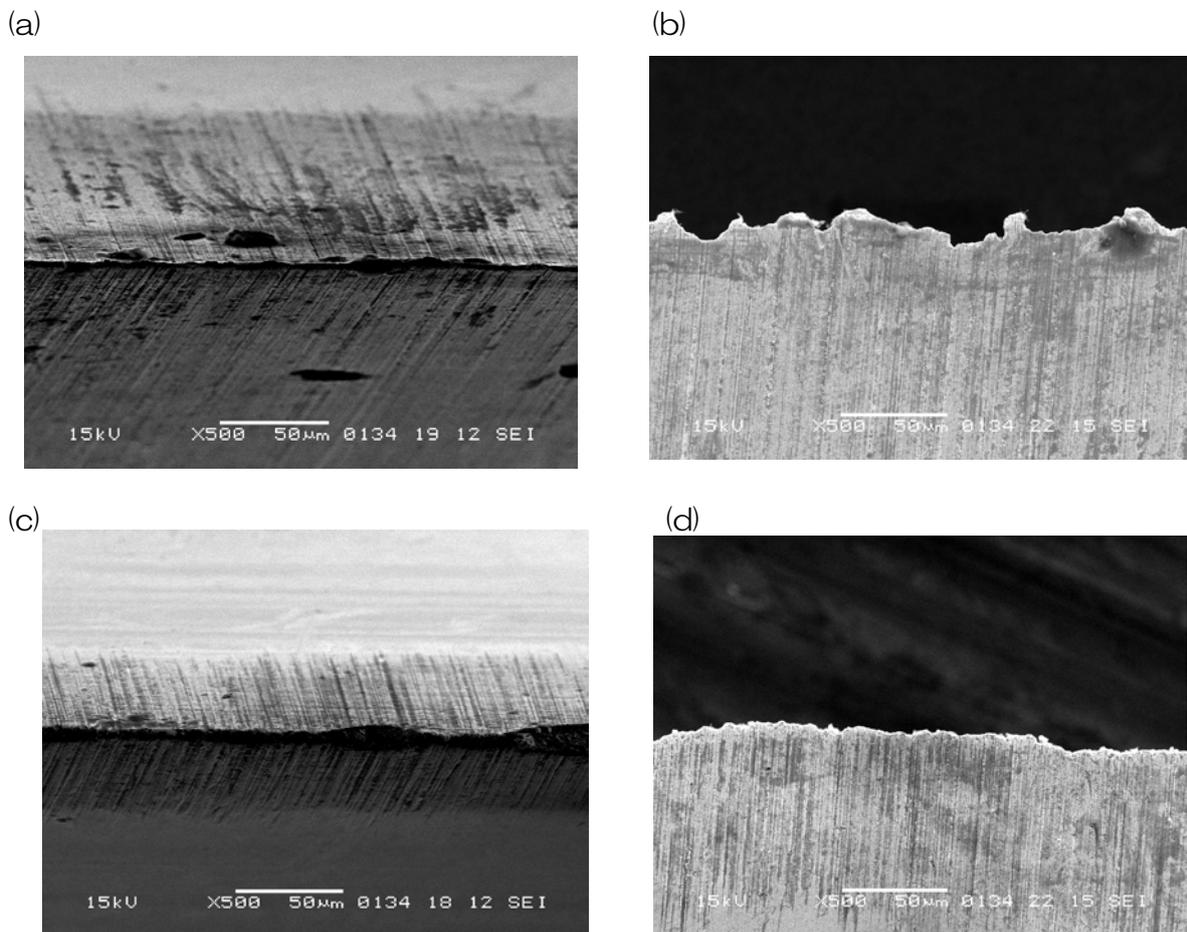


図 再研磨後の切れ刃の画像。(a)刃先、砥石 2000 番、4000rpm、(b)側面 砥石 2000 番、4000rpm、(c)刃先、砥石 2000 番、100rpm、(d)側面 砥石 2000 番、100rpm.

(3) 超音波加工用切れ刃の計測装置の開発

超音波加工用切れ刃の振動数を適宜計測することは、CFRPの超音波切断技術において、切れ刃の状態を確認できる点で特に重要である。超音波加工用切れ刃の状態を非接触で確認するため、簡易的光学系を含む計測器を開発し、切れ刃の周波数の計測を試みた。

超音波で振動する切れ刃は、20,000 Hzから40,000 Hzの周波数を持つ。このため、本研究で開発される切れ刃の振動を捕らえるためには、前記周波数よりも時間分解能の高い装置の構築が必要である。ここでは、レーザーを切れ刃に直接照射し、この切れ刃表面から反射するレーザー光を計測することにより超音波加工用切れ刃の振動数の計測を試みた。下図に実際に実験を行った超音波加工用切れ刃の計測用光学系と外観写真を示す。

ここで、Cは切れ刃、LASERはレーザー、XLはキセノンランプ、PMは光電子増倍管、DOSCはデジタルオシロスコープ、Sはシャッターを示す。

超音波加工用切れ刃の計測用光学系として構築した計測装置には、レーザー光源として連続発振のHe-Neレーザーを用いた。また、受光素子としてフォトダイオードを利用した。オシロスコープにはテクトロニクス社MDO3104を用いた。

右図に超音波加工用切れ刃の計測用光学系の計測装置を用いて測定した、超音波加工用切れ刃(公称周波数40,000 Hz 想定される周期25 μ s)の測定結果を示す。時間に対する電圧値の測定結果から、超音波加工用切れ刃の動きを捉えた正弦波は、約27.8 μ sを1周期としており、周波数は約36,000 Hzであることが確認された。このことから、超音波加工用切れ刃の計測用光学系により、非接触での超音波加工用切れ刃の周波数を計測できることが確かめられた。

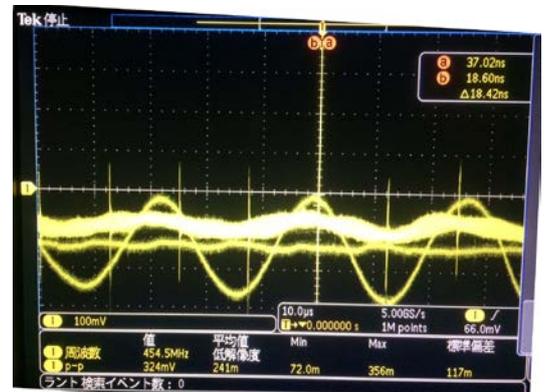


図 超音波切れ刃計測用光学系により測定された超音波切れ刃の動きを捉えた画像。横軸は時間を縦軸は電圧値をそれぞれ示す。

【2-2.加工状態評価技術開発】

加工状態を評価するための専用の評価装置を製作した。本装置は、樹脂材料を切断する時の切断抵抗等を測定する装置である。ガイドレールに被加工物をセットし、エアシリンダによる押付力と押さえにより被加工物を固定し、ニップロールの回転により送り速度を制御した。切断抵抗は刃回転中心のペアリングにより切削抵抗を荷重計に伝達させ測定を行った。

下図（右上）に代表的な切削抵抗測定データ（被加工物：絨毯材）を示す。この被加工物の場合、時間 350 ms 時に切削抵抗が最も低くなる 4m/s が最適送り速度となった。

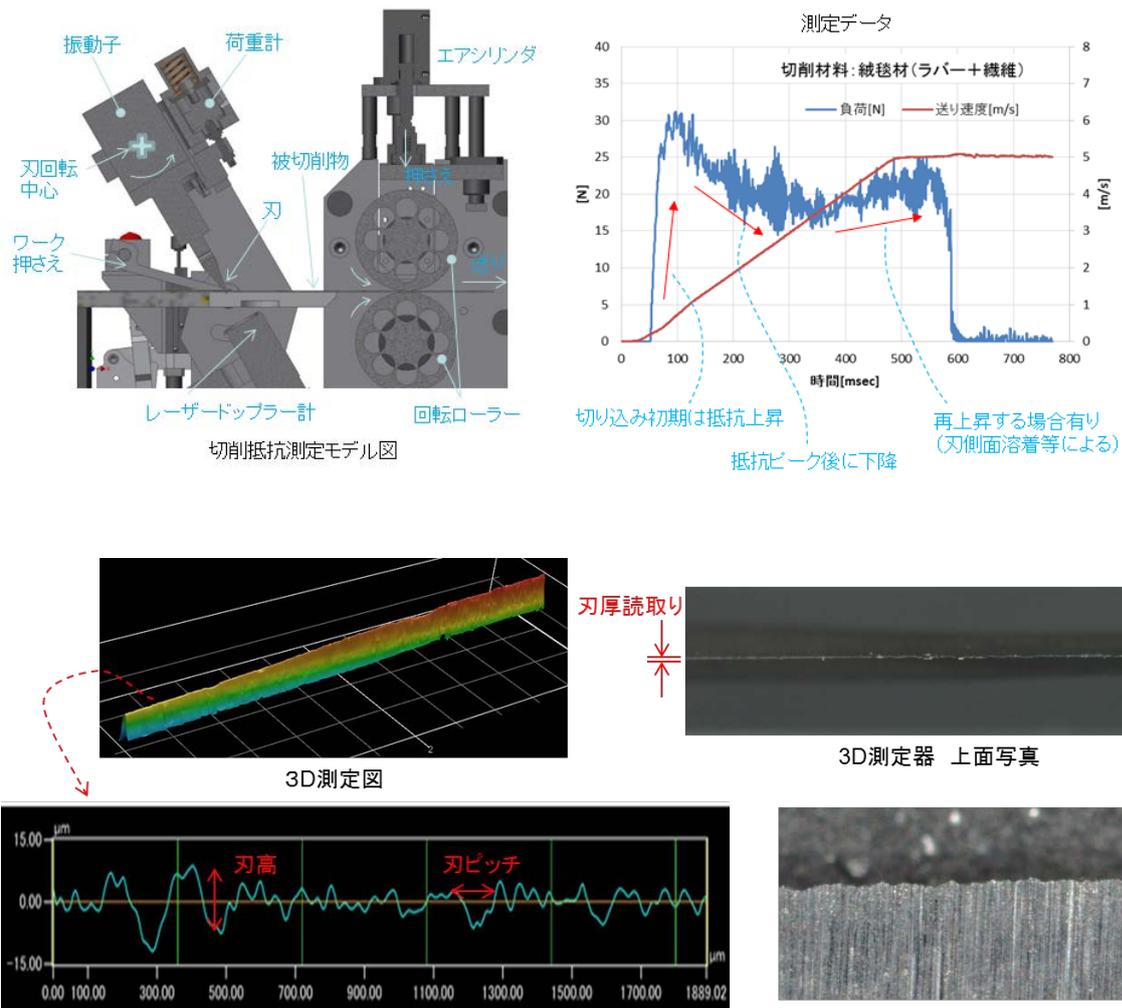


図 3 次元形状測定器および電子顕微鏡（SEM）による切削刃形状の測定・評価。

【3.再研磨タイミングのデータベース構築】

熱硬化性 CFRP の切断により人為的に摩耗させた刃物を作製した。切れ刃として、ハイス（角度 26°）、超硬（角度 26°）、超硬再研磨（角度 26°）及び超硬再研磨（角度 50°）の 4 種類を作製し、切断距離ごとの切削抵抗の最大値と平均値を測定した。切削抵抗値及びチッピング量のグラフを作成した。これらの測定値から切断の可否を選定し、その摩耗量から再研磨タイミングを割り出すこととした。以後この研磨量を元に適切な交換タイミングのデータベースを構築する。

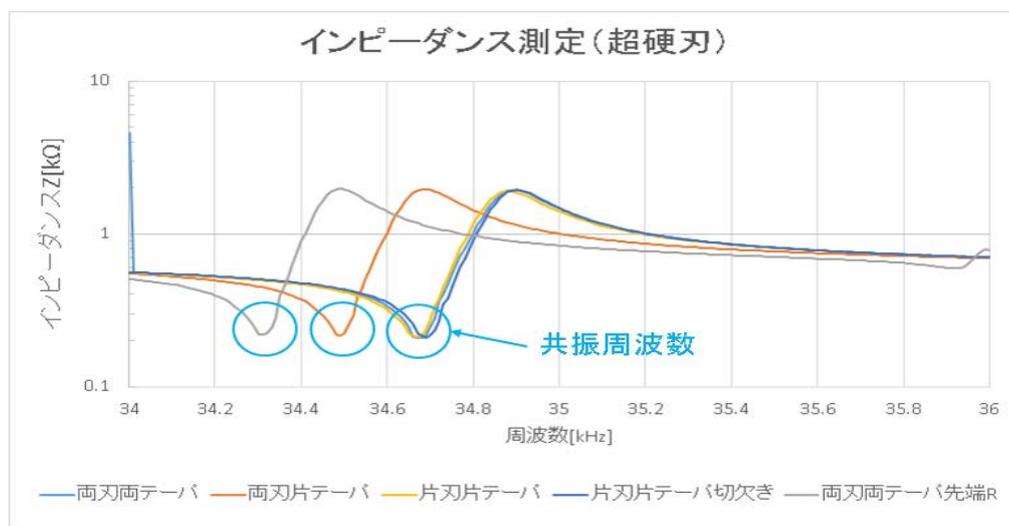
第3章 全体総括

(1) 複数年の研究開発成果

① CFRP を良好に切断可能、且つ再研磨使用可能な切れ刃開発

5 種類の CFRP 加工用刃物を設計製作した。製作した刃物のインピーダンス測定により全ての刃物で共振周波数が振動子の発振周波数 35kHz 付近であり効率的に発振していることが分かった。また非接触温度計での刃物の温度測定により異常発振による発熱がない良好に切断可能な刃物であることを確認した。

開発した CFRP 用刃物と加工実験装置を組み合わせることにより、外周切削 6 m/min の加工速度を達成した。最終的には目標の 3 倍の約 18 m/min での加工が可能レベルに達した。また、被切断物の厚みも、当初 t0.3mm 程度を狙ったが、その 3 倍の t0.9mm まで切断可能であることが確認された。

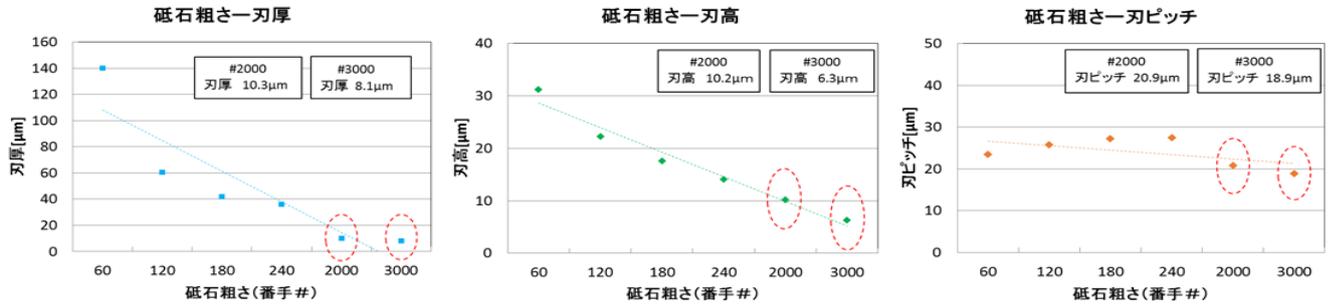


刃物インピーダンス測定グラフ

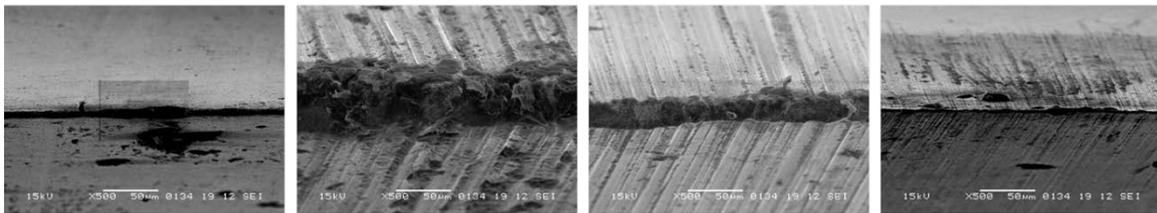


②再研磨方法開発

再研磨条件と再研磨条件選定理由を下記の図に示す。再研磨時間に関しては、当初の目標の1分以内に対して、その半分以下の20秒程度で再研磨出来た。再研磨回数は目標の20回を達成した。



刃上面SEM(電子顕微鏡)写真(x500)



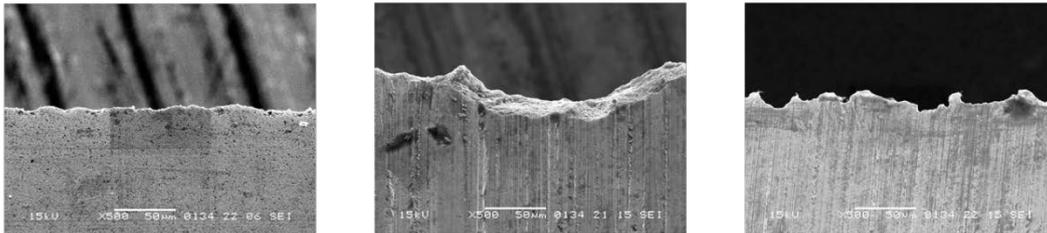
再研磨無し

#60砥石

#240砥石

#2000砥石

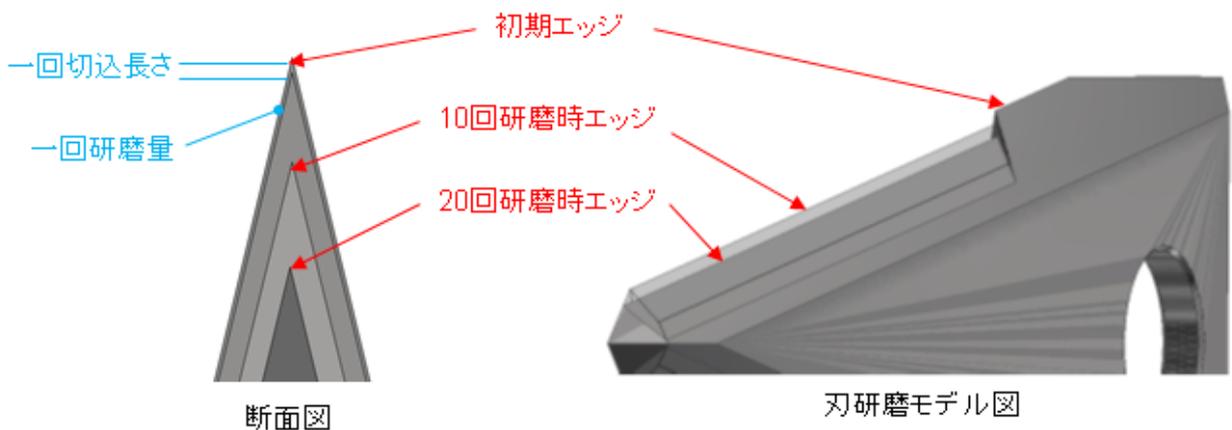
刃側面SEM(電子顕微鏡)写真(x500)



再研磨無し

#240砥石

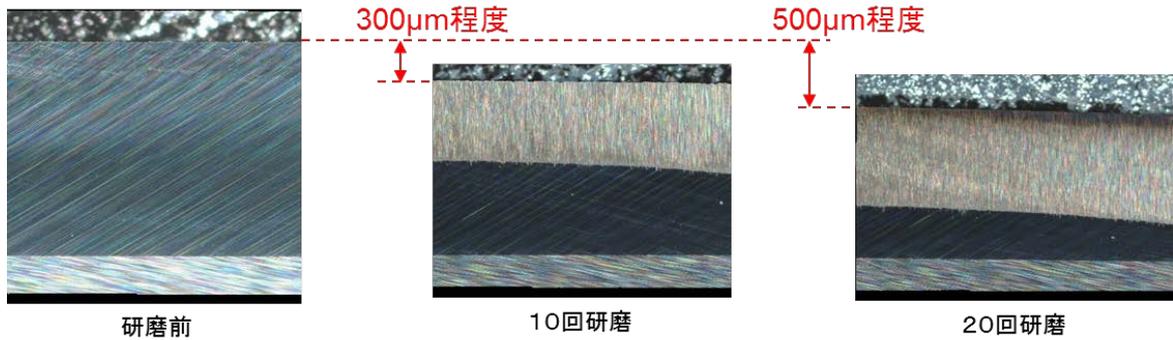
#2000砥石



断面図

刃研磨モデル図

理論切り込量と実際の研磨切り込量

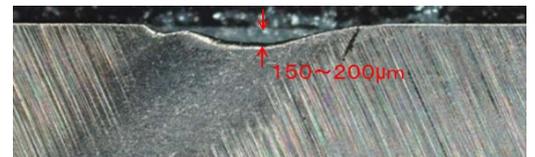
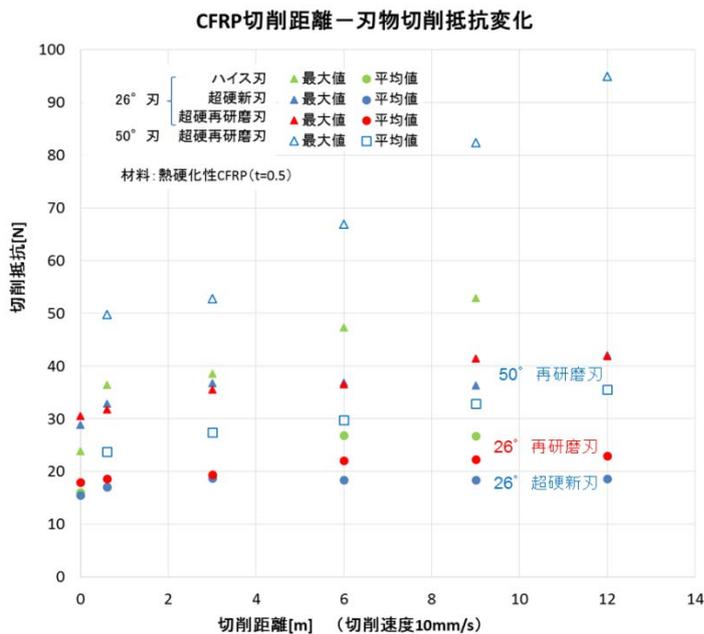


③加工状態評価技術の開発

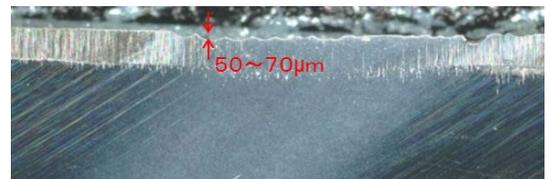
様々な加工速度で切断抵抗等を定量化することができる評価装置を開発製作した。これは、市販品の無いオリジナル評価装置である。この評価装置を刃物開発及び再研磨技術開発に活用した。

④再研磨タイミングのデータベース構築

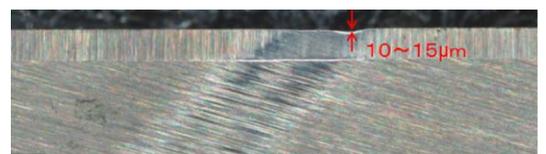
超合金製の刃物で熱硬化性 CFRP を切断する時、刃物のチップングが偶発的に発生するという当初の想定と異なる現象が生じた。チップングは刃先が衝撃や被削材の硬さに負け欠損を起こす現象である。この現象への対策として、刃先の強度向上のため切れ刃の角度を 26° から 50° まで段階的に変更した。これによりチップングの発生を抑えられる事が確認された。今後は鈍角化した刃物をどこまでチップングを防ぎながら最適な刃物にできるかが課題となる。再研磨条件のデータベースの蓄積については、上記の対策に時間を要したが 3 種の刃物データの蓄積に成功した。また外周 1000 mm の天板の薄バリ除去による刃物の耐摩耗試験を行った。被加工物と接触する位置を分散させることで刃物寿命を延ばすことに成功し、天板 300 枚のバリ取りが可能となった。



26° ハイスイ新刃6m切削(熱硬化性CFRP0.5t)



26° 超硬再研磨刃12m切削(熱硬化性CFRP0.5t)



50° 再研磨刃12m切削(熱硬化性CFRP0.5t)

熱可塑性CFRP:t0.9mm、周長1220mm、100枚の切断ではチップングは見られなかった



切断前



切断後

刃物切削抵抗変化とカケ寸法

⑤切れ刃劣化の原因究明

超音波加工用切れ刃には、少なくとも二つの劣化の原因があることが確かめられた。一方は、被加工物に含まれる樹脂の付着による劣化であり、もう一方は、超硬合金製切れ刃の構成元素（中間子）であるコバルトの欠落である。前者は、CFRPを切断する際に生じる熱により構成刃先が切れ刃に形成され、この構成刃先の残部が切れ刃に付着してしまうと推定された。また、切断加工後に確認された欠けが生じている切れ刃においても樹脂の付着が確認されることから、樹脂の付着による切断時の加工抵抗値の増加が刃物寿命の低下に影響を与え得ることが示唆された。一方、後者のコバルトの欠落は、超硬合金が摺動部品として用いられる場合の摺動摩耗と推測された。

⑥再研磨の効果

超音波加工用切れ刃に対する X 線マイクロアナライザー分析の結果から、再研磨を行う事により、切れ刃表面に付着した有機物の低減及び切れ刃の中間子であるコバルトの重量割合の低下の改善が確認された。

⑦簡易測定装置の有効性

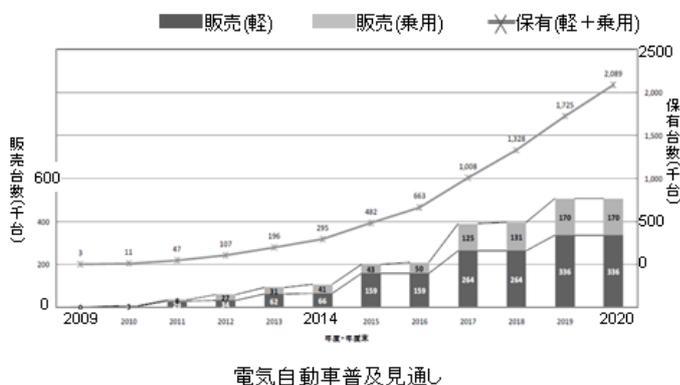
超音波加工用切れ刃の周波数を確認するための簡易計測装置を考案・作製した。

(2) 研究開発後の課題・事業化展開

自動車分野に於いて CFRP は、車体の軽量化ニーズが高まってきており、現在その利用が増え始めている。米国の規制の動向等を見ると、車体構造や材料の見直しによる軽量化が必須となっている。将来的には、例えば 2020 年には、約 160kg の CFRP を用いる等して車体の 35%軽量化を課せられる可能性がある。現在、CFRP はボンネットフードやルーフ、リアスポラーなどの外装部品や準構造部品、プロペラシャフトやシャシフレームなど重要保安部品、構造部品にまで利用が拡大しつつ有る。

航空宇宙分野においては、ボーイング B787 のように、機体重量の 50 重量%以上の CFRP が用いられ、この軽量化により従来の 20%以上の燃費向上が図られている。これらの分野で上記川下製造業者等の抱える課題及びニーズを解決するには、CFRP の成形硬化後、切断、バリ取り、リベット穴加工等々の後加工を施す技術が必要である。現状はそれに対する決定的な技術が無く、高加工コストの為、自動車産業等では、普及価格帯車種へ普及が進まない。

本開発はその為の新技术として、CFRP の加工技術を開発した。この開発された技術により CFRP 材の低加工コスト化を達成し、CFRP の普及価格帯車種等へ普及及び上述の航空宇宙分野、更に医療機器外装部品などへの普及を加速する。



2020～2030年の乗用車車種別普及見通し(民間努力ケース)

	2020年	2030年
従来車	80%以上	60～70%
次世代自動車	20%未満	30～40%
ハイブリッド自動車	10～15%	20～30%
電気自動車 プラグイン・ハイブリッド自動車	5～10%	10～20%
燃料電池自動車	僅か	1%
クリーンディーゼル自動車	僅か	～5%