

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「CFRP 部材（難切削材料）の切削加工を  
低コストで可能とする専用加工機械の開発」

研究開発成果等報告書概要版

平成24年 3月

委託者 中部経済産業局

委託先 財団法人岐阜県研究開発財団

## 目 次

第1章 研究開発の概要	
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-2 研究体制	6
(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	
1-3 成果概要	9
1-4 当該研究開発の連絡窓口	12
第2章 全体総括	13

## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

新素材として炭素繊維強化型プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastics：CFRP）が開発された。CFRP 材は、炭素長繊維をシート状にし、繊維の配列角度を変えて積層し、これらを繋ぐマトリックスとして不飽和ポリエステル等の熱硬化性樹脂または熱可塑性樹脂を利用している。

また、航空機関連業界ではボーイング社の B787 型機が商用レベルにおいて世界初の輸送機等の構造部材とし CFRP 材を活用し、現在、生産中であり、国内の川下事業者でも増産体制に備えるべく CFRP 部材に対する積極的な研究開発や設備投資を実施している。

現在は熱硬化性の CFRP 部材が航空機用に生産されているが、その技術の波及先としての自動車等の輸送機関連分野においても生産性や加工性にメリットがある熱可塑性 CFRP 部材が注目されつつ有り、CFRP に関連する市場は日本国内において、現在急速に拡大している。

この CFRP 材は機械的強度は高張力鋼と同程度の引張強度を有しチタニウム（Ti）より高い弾性率を有する他に比重はアルミニウムの6割程度の軽さであり、年々その素材自体の性能も向上している状況の中、川下事業者におけるトリミング（切断）加工や穴開け加工などの切削加工現場においては加工に難しさが伴ういわゆる難削材であり、特に他の材料に比べ切削工具の切れ刃に発生する摩耗や損傷が大きく、その工具寿命時間も極端に短いことや、加工後の CFRP 表面剥離等の加工形状精度など問題も多い。現在、国内においてはこの CFRP という部材を低コストで加工出来ないかという問題解決が様々な方法で検討、研究開発されてはいるが確立された解決策は未だ無く、CFRP 需要の拡大に一刻も早く対応するために、より経済的で高精度な穴あけ、トリミング等の切削加工技術の確立が望まれている。

本研究開発では、CFRP 部材を加工する時に工具の寿命を延ばすことが出来る切削加工技術を確立するため、「不等速回転方式」および「揺動回転方式」による切削加工機器を試作開発を実施する。その結果を踏まえ、各々の切削加工方式において、どのような効果があるかの検証を5軸マシニングセンター等の加工機器や超解カメラ（高速度カメラ）等の評価機器を活用しながら CFRP 部材の加工損傷と工具寿命の因果関係を実証し、適正切削加工方法の研究を実施する。

また、砥石を用いた仕上げ研削加工においても、5軸マシニングセンターによるジャイロヘリカル研削加工の検討と評価を行う。(平成20年度採択文部科学省東海広域知的クラスター創成事業(第Ⅱ期)の成果活用)さらに、各加工要素技術の確立を踏まえて、切削加工及び研削加工の技術を搭載した機械を設計製作し、その機械を効率的に運用できる機械動作ソフトも開発し、実用化を図る。

当初の目標のひとつである機械販売価格に関しては既存設備の超大型汎用5軸機械推定価格1億2千万円～2億円に対して、平成23年度の取り組みにて約2千万円以下にて製作した。ただしこの2千万円は原価であり販売価格ではないので、今後事業化に際し、値段の設定を詰めていく必要がある。

また、穴開け加工に関して、研究開発の結果、不等速加工が最適であり、表面粗さの品質が向上することが判明した。しかし工具のランニングコストに関しては、40%のコスト削減は達成できなかった。

また、トリミング加工に関して、研究開発の結果、揺動加工が最適である事が判明し、切削抵抗も実験の結果、約半分になり、ランニングコストも50%削減も達成可能だと推測されるが、データも十分ではないので引き続き研究開発を継続する必要がある。

ジャイロヘリカル加工に関して、知的クラスターの成果品であるハンディタイプのジャイロ穴開け機は大径穴開けにおいて、短時間で加工が出来、かつ表面粗さに置いても有効性が確認された。

< 本研究開発によって達成すべき目標値は次のとおりとする。 >

- CFRP の穴開け加工について切削長 100mm 当たりのランニングコスト目標値

	既存設備	研究開発機械の目標値
機械販売価格	120,000~200,000 千円 (超大型汎用 5 軸制御工作機械)	60,000 千円
工具価格	3,000 円 / 1 本 (例; φ6 超硬ドリル)	
工具寿命	300mm / 1 本 (例; φ6 超硬ドリル)	500mm / 1 本 (例; φ6 超硬ドリル)
切削長 100mm 当たりの加工コスト (工具のみ)	$3,000 \text{ 円} \div (300 \div 100) = 1,000 \text{ 円}$	$3,000 \text{ 円} \div (500 \div 100) = 600 \text{ 円}$ 40%のコスト削減となる

※データは同条件による一例で実際には CFRP 材質、加工条件等により寿命は異なる。

- CFRP のトリミング加工について切削長 1m 当たりのランニングコスト目標値

	既存設備	研究開発機械の目標値
工具価格	4,700 円 / 1 本 (例; φ6 超硬エンドミル)	
工具寿命	2m / 1 本 (例; φ6 超硬エンドミル)	4m / 1 本 (例; φ6 超硬エンドミル)
切削長 1m 当たりの加工コスト (工具のみ)	$4,700 \text{ 円} \div 2\text{m} = 2,350 \text{ 円}$	$4,700 \text{ 円} \div 4\text{m} = 1,175 \text{ 円}$ 50%のコスト削減となる

※データは同条件による一例で実際には CFRP 材質、加工条件等により寿命は異なる。

- 研削加工への対応

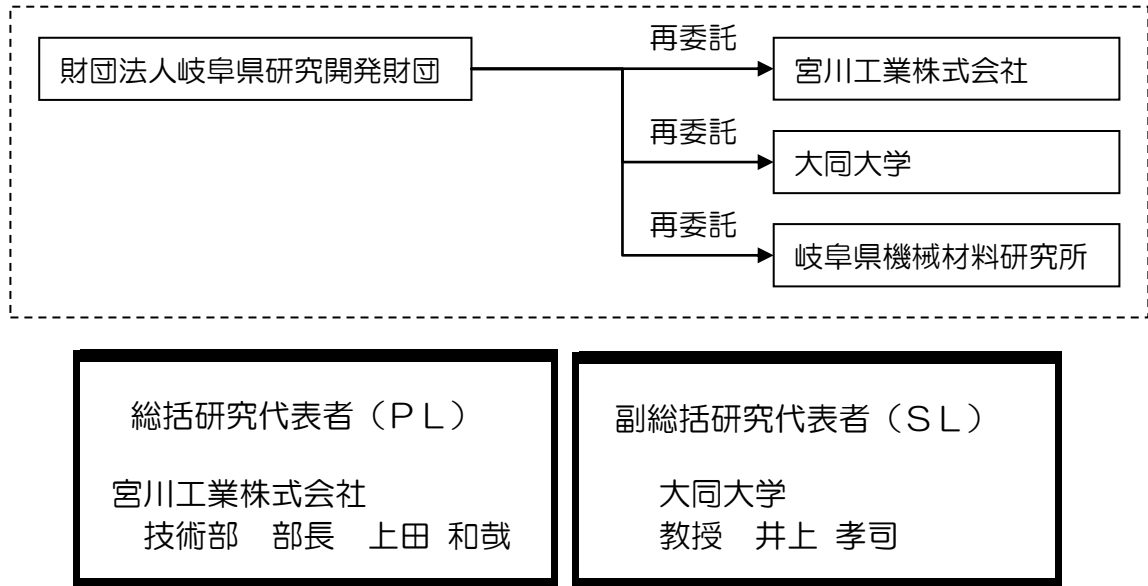
下記に示す穴開けやトリムにおける加工面の品質目標値を目指す。

項 目		既存工具 (超硬) の一般的な場合	目標値
欠損・剥離	最大高さ A	0.3mm	0.2mm
	最大幅 B	1.0mm	0.8mm
表面粗さ		Ra=10 μ m	Ra=3.2 μ m
穴 径		-0/+0.10 mm	-0/+0.076mm

## 1-2 研究体制

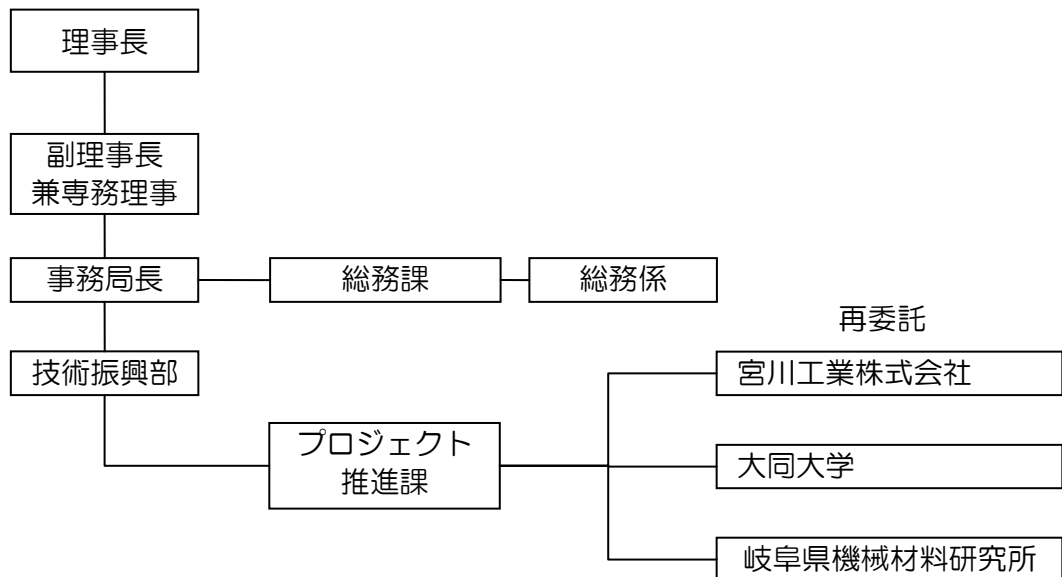
(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

### 1) 研究組織 (全体)



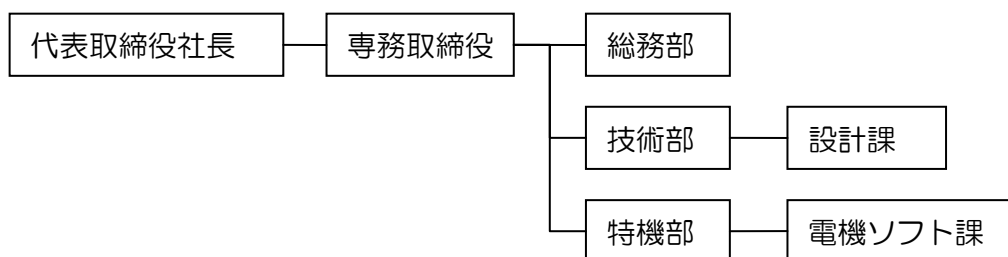
### 2) 管理体制

#### ①事業管理者 (財団法人岐阜県研究開発財団)

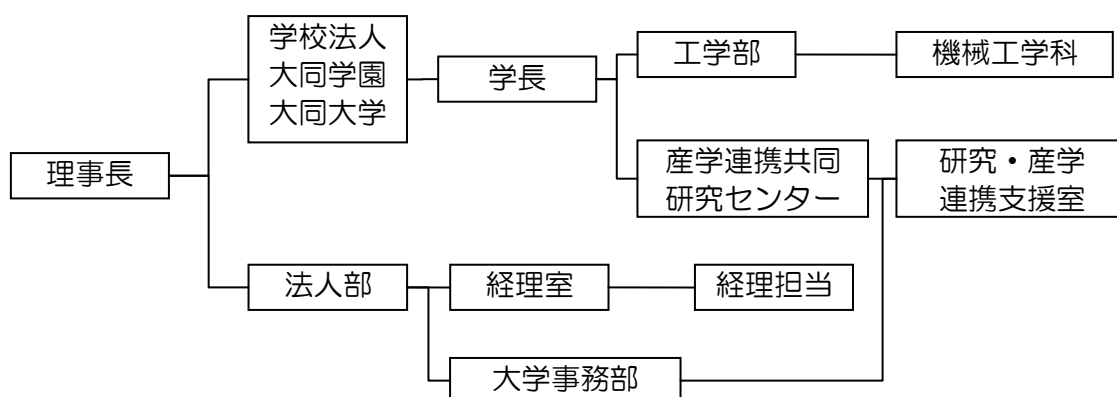


②（再委託先）

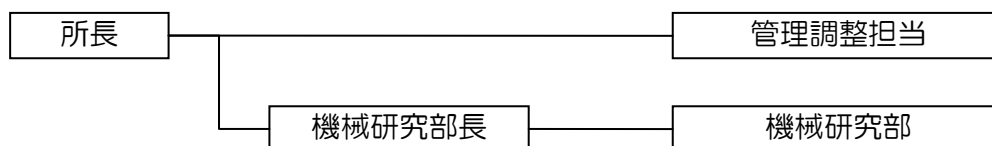
宮川工業株式会社



学校法人大同学園大同大学



岐阜県機械材料研究所



3) 管理員及び研究員

【事業管理者】 財団法人岐阜県研究開発財団

管理員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
石原 保雄	産学官連携支援センター長	⑦
鷺見 浩	産学官連携支援センター事業推進員	⑦

【再委託先】

研究員

宮川工業株式会社

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
上田 和哉	技術部 部長	①、②、③、④、⑤、⑥
田口 治由	技術部設計課 課長	①、②、③、④、⑤、⑥
大澤 結	技術部設計課	①、②、③、④、⑤、⑥
早川 晴美	特機部電機ソフト課 チーフ	⑤、⑥
高橋 良尚	特機部電機ソフト 係長	⑤、⑥
坂井 秀彰	特機部電機ソフト 係長	⑤、⑥
笠井 雄三	特機部電機ソフト 係長	⑤、⑥

学校法人大同学園大同大学

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
井上 孝司	工学部機械工学科 教授	①

岐阜県機械材料研究所

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
柘植 英明	先端加工研究部主任専門研究員	①、②、③、④
加賀 忠士	先端加工研究部専門研究員	①、②、③、④
坂東 直行	機械・電子研究部主任研究員	①、②、③、④

（実施内容）

- ①不等速回転による切削加工試験と評価
- ②揺動回転による切削加工試験と評価
- ③アイスジェットによる強制冷却試験と評価
- ④ジャイロヘリカル仕上げ研削試験と評価
- ⑤専用機械の設計製作と実証試験
- ⑥簡素機械運用システムの開発
- ⑦プロジェクトの管理・運営



## 1-3 成果概要

### ①. 不等速回転による切削加工試験と評価

工具が1回転(360°)する運動内で切れ刃の角速度を変化させる不等速回転機構をCAE(Computer Aided Engineering)を使い最適歯車形状を設計し、この歯車で構成される不等速回転主軸装置を試作しCFRP材の穴あけ加工における切削運動特性解析と機能評価を行い通常のドリル切削との違いを明らかにした。実験の結果、不等速回転加工による効果と見られるドリル刃先の摩耗量の減少やCFRP部材の加工形状精度への良好な結果を確認できた。また、振動を抑制するには歯車のバックラッシュを、より0に近づけることが重要な要素である事が判明した。

大同大学においては試験用に宮川工業が製作した不等速ヘッドを使用し、CFRPと非鉄金属材料であるMg合金とTi合金の2種類に対して貫通穴あけ加工を行い、切削加工中のトルク荷重とスラスト荷重、それに仕上げ面粗さとケバ立ちを含めた加工穴形状を調べ不等速回転運動機構と切削加工条件との関係を明らかにした。また非鉄金属材料に対しては切削加工温度と切削動力、不等速運動機能を中心に解析を行う。なお本装置の加工特性を比較する方法として汎用的なドリル加工法(等速回転切削)も合わせて実施した。

### ②. 揺動回転による切削加工試験と評価

宮川工業に於いて、揺動装置をCFRP部材の切削加工基礎試験が出来るように仕様追加し、宮川工業社内設備である汎用機械に取り付けて市販のドリルやエンドミルを用いて揺動回転方式に係る切削加工特性を究明するための切削加工試験を実施した。試験加工したCFRPの加工結果については、孔バリに関しては等速回転に対して良い傾向が観測できた。表面粗さに関しては、孔開けに関しては等速回転より良い効果が観測できた。トリミングに関しては刃具保持方式に把握力不足問題が存在した。

最終年度はユニットの小型化とトリミング試験加工が実施出来る剛性を備えたユニット形状の装置として設計を進めた。駆動機構はギヤ伝達とし、軽量化と振動対策のため歯車にはエンジニアリングプラスチック歯車と鉄製の平歯車でギヤトレインを構成し、自転回転数は4,000RPM、公転回転数は9,

800RPM で揺動幅は 0.1mm とした。試験加工の結果、等速加工に比較して切削抵抗力が少なく揺動の効果が確認出来た。

### ③. アイスジェットによる強制冷却試験と評価

アイスジェット装置を活用し、上記、不等速回転ならびに揺動回転方式による切削加工試験を実施する際に、CFRP 部材を切削する刃具側面にアイスジェットを吹き付け、アイスジェット方式による切削加工の強制冷却を行い、通常の加工と比較することによる加工損傷の状況と工具寿命の関係等から、切削加工特性を究明するための実験を実施した。アイスジェットによる強制冷却は CFRP の剥離等の影響を考慮し CFRP に冷気を放射するのではなく、回転中の刃具側面に放射した。試験加工した CFRP の加工結果については、孔バリに関しては等速回転に対して良い傾向が観測できた。表面粗さについては、孔開けに関しては等速回転より良い効果が観測できた。岐阜県機械材料研究所では、この試験片で超音波探傷検査機等による被削材評価装置を活用して、CFRP 部材の加工面周辺の損傷状況観察等による評価を行なった。比較検討の結果、はっきりとした効果は現れていない。

試験に使用した CFRP 供試材はプリプレグ単方向材を幾重にも積層成型した高靱性材の為、CFRP 加工形状精度において、アイスジェットの噴出力により CFRP の表面繊維が剥離しやすいという弊害が著しく表面化した。機械搭載の検討においてもアイスジェット噴射装置独特のノズル形状等のサイズ的要因と、ノズルから冷却ポイントまでの有効冷却範囲を考えると、アイスジェット噴射装置の CFRP 加工機械搭載は適切でないと判断した。

### ④ ジャイロヘリカル仕上げ研削試験と評価

増速スピンドルユニットを 5 軸同時制御マシニングセンターに装着し、一般的な円筒形状砥石とダイヤモンド円筒形状電着砥石による基礎的な動作検証を岐阜県機械材料研究所と共同で試験を実施した。CFRP 穴加工の仕上げ工程における研削加工に適切な砥石形状は円筒状の砥石ではなく、球型のダイヤモンド電着砥石が適切だと判断して試験を実施した。岐阜県機械材料研究所において試験結果を検証した結果、加工損傷の状況と研削加工特性を把

握した。

ジャイロ加工プログラムに関しても穴入り口からのジャイルヘリカル動作プログラムを作成、シミュレーションソフトにて検証した。

次に増速SPユニットを5軸マシニングセンターに取り付け、5軸同時加工用ソフトウェアやシミュレーションソフトウェア等を活用して、5軸マシニングセンターのプログラムを作成し、各種加工条件を設定し研削加工試験を実施した。その結果、加工損傷の状況と研削加工特性を把握した。

試験の結果、球型の砥石では表面粗さの細かい部分で凹凸が残り、砥石の形状はティアドロップ型のダイヤモンド電着砥石が最適なことが判明した。

#### ⑤専用機械の設計製作と実証試験

CFRP 部材は非常に高価なため確実に、しかも能率良く加工することを目的に機械の構成について検討した結果、ロボットの活用による機械構成が価格等あらゆる点で有利になると判断し、その基本設計を基に各加工要素技術や集塵装置が搭載できる専用機械の設計、製作を実施した。

#### ④簡素機械運用システムの開発

穴開け、トリミング加工のみに特化した作業者が簡単に操作できる生産性の高い機械運用システムを検討した結果、作業者が直感的に操作可能であると同時に、上位3次元CADデータを活用できるロボットCAD/CAMを利用することが、この機械運用システムをより簡素化できる一つの要素として適切であると判断した。また本研究開発テーマの主題であるCFRP加工装置とリンクして生産性を高める機械運用システムの中核として川崎重工業製のCAD/CAMソフト「KCONG」を選定し誰でも容易にトリミング加工や穴開け加工がプログラムできる機械運用システムを構築した。システムの特長として3次元CADソフトで作成されたモデルを活用し基準面の指定やエッジの指定のみで切削経路を作成、ロボットで加工が出来る。また、hyperMILL等汎用5軸マシニングセンターで使用されるCAD/CAMソフトを使用して作成されたNCプログラムのGコードを取り込み、3次元モデル上に展開、切削加工が出来るシステムを構築した。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

本プロジェクトに関連した問い合わせに対応する窓口は次の通り。

- 1) プロジェクト全体の運営に関する事項  
財団法人岐阜県研究開発財団 (TEL058-379-2212 FAX058-379-2215)  
研究開発事業 事業推進員 鷺見浩 ([hsumi@gikenzai.or.jp](mailto:hsumi@gikenzai.or.jp))
  
- 2) 各加工要素技術を搭載した機械開発、動作ソフト開発に関する事項  
宮川工業株式会社 (TEL0575-22-1411 FAX0575-22-1417)  
技術部 部長 上田和哉 ([ueda@miyakawa.com](mailto:ueda@miyakawa.com))
  
- 3) 切削加工技術全般に関する事項  
大同大学 機械工学科 (TEL052-612-6111 FAX052-612-5623)  
創造製作センター長 教授/工学博士  
機械工学科専攻長 井上孝司 ([takinoue@daido-it.ac.jp](mailto:takinoue@daido-it.ac.jp))
  
- 4) ジャイロヘリカル加工に関する事項  
岐阜県機械材料研究所 (TEL0575-22-0147 FAX0575-24-6976)  
先端加工研究部専門研究員  
加賀忠士 ([kaga@metal.rd.pref.gifu.jp](mailto:kaga@metal.rd.pref.gifu.jp))

## 第2章 全体総括

### ①不等速回転による切削加工試験と評価

#### 平成21年度

- 工具の摩耗量に関して、良くなる傾向が見られた。
- CFRP の剥離に関して、まだ比較検証ができていない。
- 表面粗さに関しては目に見えて効果が現れていた
- 楕円形歯車の仕様変更を実施、最適な不等速パラメータを究明が課題。
- ヘッドの振動を抑え、高速回転域で実用できる不等速ヘッドの設計改良を行う。
- トリミング加工に耐えうるヘッドの剛性設計を実施する。

#### 平成22年度

- 等速回転加工において工具回転数が10,000回転付近での高速回転領域の結果が良好であることを確認した。
- 同一条件下の等速、不等速の比較では、刃先摩耗量、剥離量、表面粗さ、すべての評価項目に対し不等速加工の良い効果が実証出来た。
- 来年度は現状のヘッドより振動が少ない構造の独立型不等速ユニットを開発する

#### 平成23年度

不等速回転運動のメカニズムであるブーメラン型の不等速歯車は内接円と外接円の差が大きいため、その速度差も大きい。よって不等速回転の効果が明確になる事が判明し不等速回転の動作解析の結果、不等速回転装置が持つ回転周期の波形とトルク荷重から得られる作動波形が一致した。

不等速回転切削は繊維のせん断に効果的であり、CFRP 材の問題点の貫通時のケバ立ちを低減できた。不等速回転切削での加工面の粗さはトルク荷重、スラスト荷重が低くなったときが良好である

マグネシウムに対する不等速の影響に関しては等速回転切削に比べ不等速回転切削の方が加工穴内面の精度の向上、粗さの低減が確認できた。工具ではダイヤコート超硬ドリルより PCD ツイストドリルの方が粗さが減少

する作用が顕著に表れ、切りくずの分断効果も確認できた。

チタンに対する不等速の影響に関して Ti 合金(6Al-4V)の加工は低切削速度、低送り量条件の場合、仕上げ面粗さは大きくなる。高速切削で高送りの切削条件では、加工中に工具切れ刃と被削材間で火花の発生と工具の焼付き現象が起きる。また加工穴周辺に発生するバリ高さも大きくなる。本実験条件中では、切削速度 38(m/min)、送り量 0.04(mm/rev)の加工条件で最も良好な加工形状を得ることができた。この事は本装置を用いる場合の最適加工条件となる領域が存在する事を意味している。また、超音波探傷検査の結果、切削条件により損傷の度合いが変化し、加工前CFRP自身に大振幅高調波散乱源がみられることやCFRPの位置により大振幅高調波散乱源のバラつきがあることから、加工前サンプルのデータ取得、その位置における加工後の超音波検査を実施することが望ましい。

装置自体に関しては、ユニット化し小型化することが出来た。

今回の不等速ユニットを製作するに当たり振動軽減を課題に研究開発を進めてきたがギヤートレインのバックラッシュ除去が問題解決の糸口となる事が判明した。今後はバックラッシュ除去した高精度なユニットを製作する事が課題となる。

また、ユニットのみを販売するビジネスモデルも模索する。

## ②. 揺動回転による切削加工試験と評価

平成21年度

- 揺動装置の仕様変更を実施、最適な揺動回転仕様を究明した。
- トリミング加工に耐えうる揺動回転仕様も検討した。
- 工具の摩耗量に関して、良くなる傾向が見られた。
- CFRP 穴開けによる剥離に関しては揺動の回転が影響している剥離が見られた。
- 表面粗さに関しては目に見えて効果が現れた。

平成22年度

- 揺動における穴加工においては優位性が確認出来なかったが、トリミング加工においては効果が現れ、優位性が実証された。
- モーター出力を高めた独立型ユニットを製作し継続して試験を行う。

平成23年度

揺動による切削加工は今回のCFRP加工試験によって切削負荷が通常の加工に比較して半分ほどとなる結果となった。また、超音波探傷検査の結果、切削条件により損傷の度合いが変化し、加工前CFRP自身に大振幅高調波散乱源がみられることやCFRPの位置により大振幅高調波散乱源のバラつきがあることから、加工前サンプルのデータ取得、その位置における加工後の超音波検査を実施することが望ましい。今後は継続して切削試験を進め刃物の耐久性を確認し、さらなる機械耐久性の機能も備え完成されたユニットを製作する。

また、ユニットのみを販売するビジネスモデルも模索する。

### ③. アイスジェットによる強制冷却試験と評価

平成21年度

- 工具の摩耗量に関して、大きな差異は観測できないが効果は現れている。
- CFRP の剥離に関して、アイスジェットの CFRP 素材自体に吹き付けによる剥離が見られる。
- 表面粗さに関しては目に見えて効果が現れている。
- CFRP の剥離がアイスジェットの吹きつけ部位に影響を与えているため、吹きつけ部位の検討と吹きつけノズルの仕様変更を検討する。
- アイスジェットの吹きつけによる切削粉塵の飛散が問題となるので、粉塵回収の検討を実施する。

平成22年度

- アイスジェットにおいてはCFRP部材剥離の問題が顕著に有り、CFRP部材を加工するには適切でないと判断した。



#### ④. ジャイロヘリカル仕上げ研削試験と評価

平成21年度

- 次年度の試験には機械運用において加工ソフトの追加（シミュレーションソフト等）の必要性が判明した。
- 電気制御式の高速スピンドルを選定する必要があることが判明した。

平成22年度

- ジャイロの基礎的試験を実施した。
- ジャイロ加工を適用できる、5軸マシニングセンター上でのプログラム作成を実施し、検討した。
- ジャイロの基礎的試験を実施した。
- ジャイロ加工を適用できる、5軸マシニングセンター上でのプログラム作成を実施し、検討した。

平成23年度

5軸マシニングセンターによるジャイロヘリカル研削試験により、穴加工に対するジャイロヘリカル運動の効果が実証され、岐阜県機械材料研究所との共同で実施した砥石の検討は電着ダイヤモンド砥石で形状はティアドロップが最適である事が判明した。知的クラスターの成果品であるジャイロヘリカル穴開け装置による研削試験においてもバリのでない、綺麗な穴加工をすることが可能となった。

超音波探傷検査の結果、表層部近傍にクラックが発見された。現段階では、素材にクラックが存在していたか、加工によって発生したかを確定することは難しい。そこで、超音波探傷検査による加工前サンプルのデータ取得、その位置における加工後の超音波検査を実施し、加工による影響なのか、素材から問題が起きているかを調べる課題が残された。

ジャイロヘリカル装置は複雑な運動をする機械装置で有り、ある程度の剛性を保持した治具、あるいは当該機械装置のロボット先端に固定し、CFRP 部材に対して研削穴加工を実施すれば、品質が安定した CFRP 製品を安定的に生産出来る可能性を備える事が判明した。

## ⑤. 専用機械の設計製作と実証試験

平成22年度

低コストなCFRP専用加工機械と、その運用システムの検討についてはCFRPを取り巻く様々な要因を考え、治具方式とロボット、ロボットCAD/CAMで構成された加工システムが適切であると判断し、次年度、試作する。

平成23年度

ロボットによるCFRP加工装置は、安価なロボットと、適切で高精度、高い剛性の走行軸を使用することにより、加工精度±0.1mm程度の加工が当該研究開発の試験結果により可能な事が実証され、高価な工作機械を設備投資せずとも走行軸の適切な設計により高い可用性と汎用性を備える事が出来る加工装置を川下事業者提供することが可能となった。

走行軸は今回の研究開発ではプロトタイプとして製作したが、今後の事業化という側面で、この走行軸のみを市場動向にあわせ規格化、モジュール化をし、走行軸のみを販売するビジネスモデルも展開することも可能となる。

## ⑥. 簡素機械運用システムの開発

平成23年度

本研究開発で採用した KCONG 等のソフトにより、基準面やトリミングラインの指示のみで加工プログラム作成が出来る事が判明し、hyperMILL等の汎用 CAD/CAM より生成した G コードを活用出来る機械運用システムも構築出来、リードタイムの短縮の実現に目処がついた。

ただし、一部の切削経路修正部分等のユーザーインターフェースにおいて段取りよく修正できないという課題もあり、今後、ロボット特有の運動方法を回避できる機能を、装備しなければいけない事が判明した。