

平成22年度 戦略的基盤技術高度化支援事業

「難削材、及び新素材の高能率、高精度加工を  
可能にする切削工具の開発」

研究開発成果等報告書

平成23年 3月

委託者 中部経済産業局

委託先 財団法人名古屋産業科学研究所

## 目次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的および目標	1
1-2 研究体制(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	2
1-3 成果概要	5
1-4 当該プロジェクト連絡窓口	5
第2章 加工方法の分析	6
2-1 研究目的及び目標	6
2-2 実験方法	6
2-3 研究成果	19
第3章 適正切削工具の開発(材質について)	20
3-1 研究目的及び目標	20
3-2 実験方法	21
3-3 研究成果	23
第4章 切削工具の開発(工具形状について)	24
4-1 研究目的及び目標	24
4-2 実験方法	24
4-3 研究成果	25
第5章 全体総括	26
5-1 成果の総括	26
5-2 工業所有権の取得状況及び対外発表等の状況	27

## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景・研究目的および目標

#### 1-1-1 研究開発の背景

近年、CFRP やチタン合金、またはそれらの複合型材料など難削材の切削加工において、硬度と耐久性を兼ね備えた刀具が、航空機機体材料開発、高精度自動車部品開発の現場で強く求められている。これら難削材は高硬度であり、熱伝導率が低いため、切削加工時に刃先が高温となり、刃先の欠損や製品の加工精度不良などが問題となってきた。現在 CFRP やその複合型材料の加工用工具として、超硬工具の表面に多結晶ダイヤモンド膜を気相成長させ切れ刃部の硬度を高めたもの(ダイヤコーティング超硬)やダイヤモンド焼結体(PDC)工具などが開発され、実際の加工現場で使用されている。しかし、何れの工具も航空機製作業界の目標値を達成する性能が得られておらず、価格も1本、数万円以上と高額であり、加工コストを非常に高くしている。このため、早急に長寿命な工具の開発が求められている。

#### 1-1-2 研究の目的

本研究開発は、従来の焼結製法で作られた工具材料や高硬度被膜の付加等による工具開発ではなく、炭化珪素(SiC)単結晶を切れ刃先に搭載した切削工具を開発し、航空機の機体材料の高精度かつ高能率加工を可能にする。

#### 1-1-3 研究の目標

プロジェクトの研究目標は以下のとおりである。

従来のダイヤコーティング超硬工具やPCD工具と比べ5倍以上の製品寿命、及び性能を発揮する、SiC単結晶を切れ刃に搭載した切削工具を開発する。

切削加工において、サブミクロンオーダーの仕上げ面を創成できる切削工具を開発する。

本プロジェクトは、大きく分けてⅠ～Ⅲの研究項目からなり、それぞれ平成22年度の目標を以下のように設定している。

#### Ⅰ 加工方法の分析

平成22年度は、SiC単結晶を搭載した穴加工用ドリルでCFRP複合材料の高能率、高品位穿孔加工が実用化できる最適切削条件を確立する。

#### Ⅱ 適正切削工具の開発(材質について)

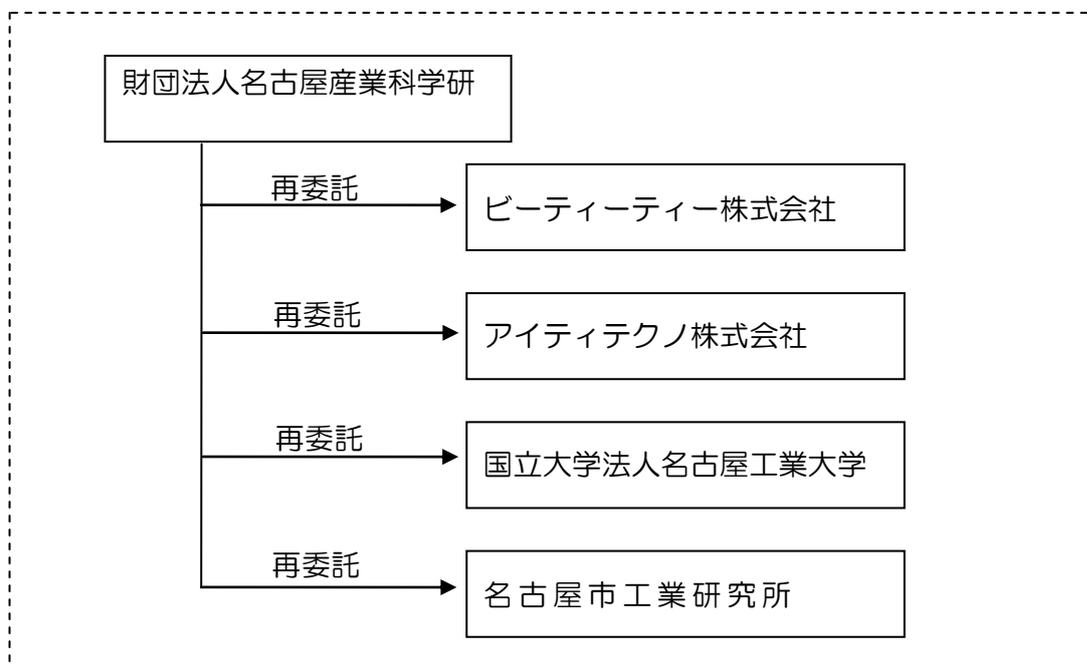
平成22年度は、SiC単結晶工具の3次元超平坦化加工の量産化を実現できる製造工程を開発する。

#### Ⅲ 切削工具の開発(工具形状について)

平成22年度は、SiC単結晶を搭載したCFRP複合材料のトリム加工用エンドミル形状の開発と穿孔加工用ドリルの量産が可能な製造工程を開発する。

## 1-2 研究体制

### (1) 研究組織

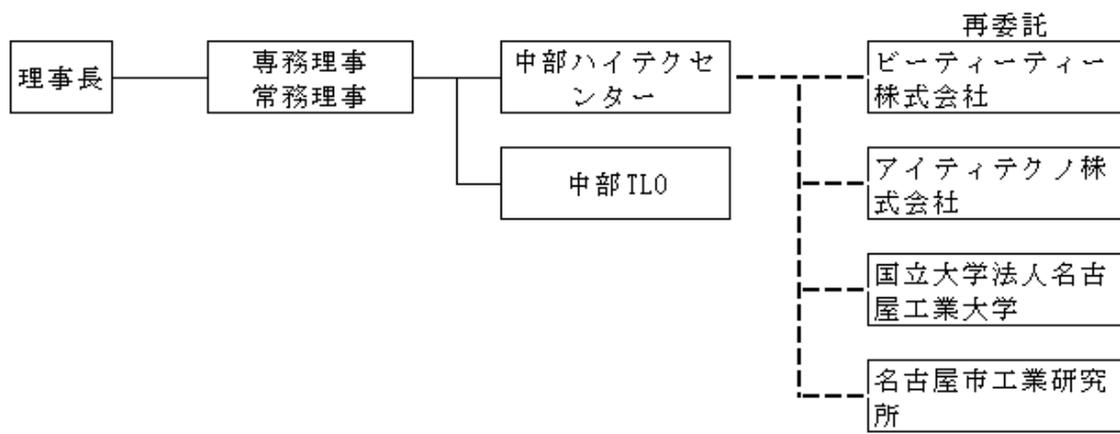


総括研究代表者（PL）  
所属・役職・氏名  
ビーティーティー株式会社  
代表取締役  
青木 渉

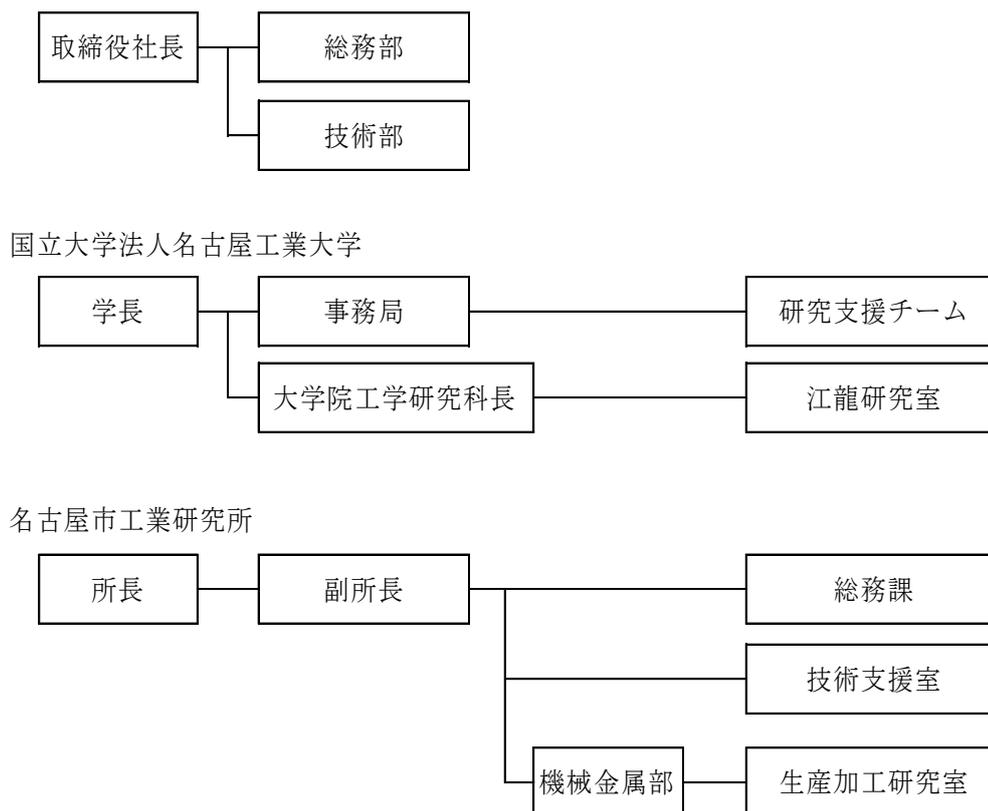
副総括研究代表者（SL）  
所属・役職・氏名  
国立大学法人名古屋工業大学  
大学院工学研究科 教授  
江龍修

## (2) 管理体制

### ① 管理法人



### ② 再委託先



(3)研究者氏名、

ビーティーティー株式会社

氏名	所属・役職
青木 渉	代表取締役
中村 剛	研究開発部
大野 英幸	研究開発部

アイティテクノ株式会社

氏名	所属・役職
伊藤 宏昭	技術部
飯田 剛	技術部

国立大学法人名古屋工業大学

氏名	所属・役職
江龍 修	大学院工学研究科 教授

名古屋市工業研究所

氏名	所属・役職
清水 孝行	機械金属部 生産加工研究室 主任研究員
増尾 嘉彦	技術支援部 主幹

(4)協力者(アドバイザー)

社団法人 中部航空宇宙技術センター

三菱重工業株式会社 名古屋航空宇宙システム製作所

株式会社 ナベヤ精機

株式会社 マクシス・シントー

### 1-3 成果概要

平成22年の本研究開発により、以下の成果を得ることができた。

実用的 SiC ドリル 2010-001 型及び 2010-002 型による CFRP とチタン・アルミの複合型材料の穿孔試験によりそれぞれの穿孔加工において製品の高品位性(安全性)を維持できる基本的な最適切削条件を明らかにした。これにより、従来の切削条件で発生していた加工歪みや金属疲労を発生させる切削応力を SiC 単結晶ドリルにより最小限に抑えた高能率加工が実用において可能とした。

さらに、CFRP 材料のトリム加工において、SiC 単結晶エンドミルを使用し、従来の切削に於いて多く発生したバリや、切削面の変質を大幅に抑制出来る条件を見出した。これにより、高品位な製品精度を維持した高能率加工を可能とした。

また、SiC 単結晶チップを使用した $\beta$  チタンの旋削加工において、切削面に無歪みに近い表面層を発現させる切削条件を発見した。切削した切り屑にも変質は無く、切り屑表面に安定した二酸化チタン(TiO<sub>2</sub>)を発現させることに成功した。

さらに切削速度を従来の6倍以上に出来ることが証明された。

SiC 単結晶チップを使用したアルミ製品の切削加工試験では従来のアルミ切削条件の 5 倍以上の高能率加工においても従来のアルミ部品の品質以上の精度を実現出来ることを明らかにした。

SiC 単結晶の平面、及び 3 次元曲面の平坦化研磨方法の研究において、曲面 CMP 研磨機を開発し、SiC ドリル 2010-001 型及び 2010-002 型及び、SiC エンドミル、SiC 旋削チップに搭載する SiC 単結晶の CMP 研磨加工を可能にした。さらに量産研磨(CMP)システムを考案し、SiC 単結晶仕上げ加工の量産化に成功した。

CFRP の穿孔加工用 SiC ドリル 2010-001 型及び、CFRP/Ti/AL 複合材の穿孔加工用 SiC ドリル 2010-002 型工具のスペックを決定し、両者の製造工程を短縮し量産化を可能にした。また、CFRP/Ti/Al 複合材の大径穿孔加工用 SiC ドリル 2010-003 型を開発し工具材料の大幅なコストダウンを可能にした。

さらに CFRP トリム加工用 SiC エンドミルを開発し高精度な切削面と切り屑飛散による作業現場の大幅な環境改善を可能にした。

### 1-4 当該プロジェクト連絡窓口

財団法人名古屋産業科学研究所 産学連携支援部門

中部ハイテクセンター 産学連携支援部長 藤根 道彦

TEL 052-223-6639 FAX 052-211-6224

E-mail: fujine@nisri.jp

## 第2章 加工方法の分析

### 2-1 研究目的及び目標

#### 2-1-1 研究目的

使用する各種加工機械により異なる環境に対応した切削条件を構築する。CFRP 複合型材料や難削材の切削加工に適した加工方法(工具負荷、熱伝導、高温強度、切削方向など)の分析、及び使用する各種工作機械により異なる環境(剛性、出力)に対応した切削条件を研究する。

#### 2-1-2 研究目標

本年度は、SiC 単結晶を搭載した穴加工用ドリルで CFRP 複合材料の高効率、高品位穿孔加工が実用化できる最適切削条件を確立する。

### 2-2 実験方法

#### 2-2-1 切削現象の研究(CFRP 穿孔加工)

穿孔加工用 SiC ドリル 2010-001 型及び 002 型による CFRP 材料の穿孔試験  
SiC 単結晶の穿孔工具による CFRP 材料の切削現象の研究のため NC フライス盤を使用して CFRP の穿孔実験を実施し切削動力計による切削抵抗の測定による解析を行った。

#### ① 切削実験 No.1

##### ① -1 2010-001 型及び 2010-002 型ドリルによる CFRP 材料の穿孔試験

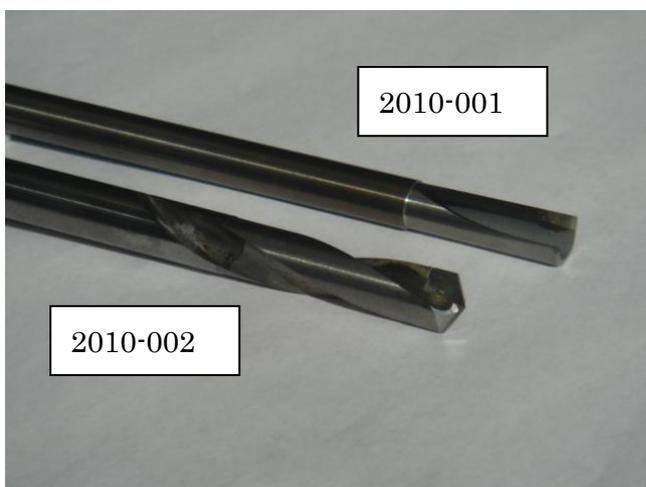


写真 1

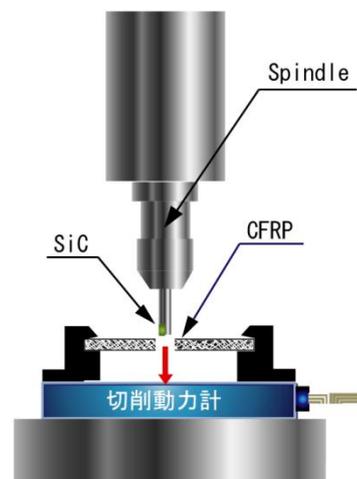
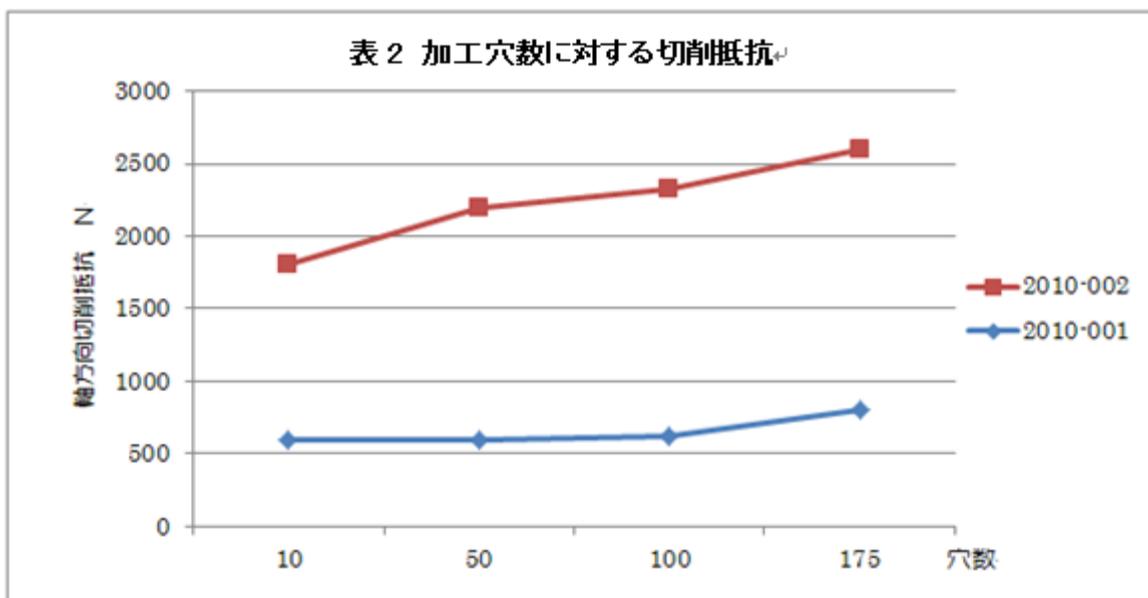
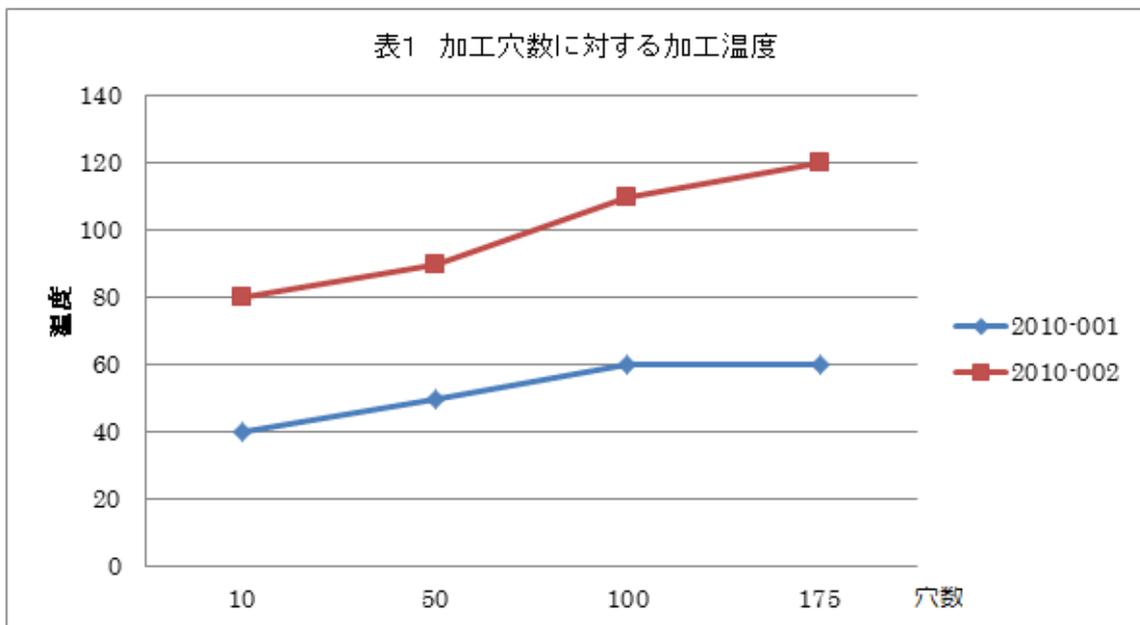


図 1

図1の様にフライス盤のベッドに切削動力計を設置しその上に厚み 12mm の CFRP 材を治具で取り付け試作開発した SiC 単結晶ドリル 2010-001 型、と 2010-002 型(写真1)を使用して穿孔実験を行った。

切削条件は、回転数 2000rpm、送り 375mm/min 使用した CFRP 材料面積での最多穴 175 穴で終了とした。試験結果を表 1(加工温度)と表2(切削抵抗)に示す



2010-001 型ドリル(001)と2010-002 型ドリル(002)を同切削条件において CFRP 材の穿孔実験を行った結果、切削抵抗値は 001 が 002 の 1/2 程度であり切削直後の CFRP 材の温度も約 1/2 であった。001 は刃数が 1 枚刃であるが穿孔加工において穴中心部分を切削せず、リング上に切削していき非切削部分はペレット状になって排出されるため本穿孔加工で除去する穴の体積に対する切削量は 1/2 以下になる。これに対し 002 は従来型のねじれ溝をもつ 2 枚刃のドリル形状のため、本穿孔加工で除去する穴の体積すべてを切削する事になる。双方の切削量(切り屑量)の違いは 002 が 001 の 2 倍以上になるである事から切削実験の結果のように 002 の切削抵抗が大きく SiC 単結晶の磨耗量も多いことが解った。以上の実験結果から CFRP 材の穿孔加工では 001 のドリル形状が有効であると判断できた。表 3 に 001 のドリルと 002 のドリルで穿孔加工した CFRP 材を示した。

図 3 は CFRP 穴品質の評価基準でありバリやデラミ 001/002 とも穿孔加工後の DRP 穴入り口、出口共に品質基準内に入ったが、001 の方が見た目にも数値的にも精度が高いことが解る。

ドリル形状の違いによるCFRP材の穴形状と品質精度の比較

2010-001 ドリル加工穴			2010-002 ドリル加工穴																				
加工後のCFRP (T2-12T)			加工後のCFRP (T2-12T)																				
穴入り口			穴入り口																				
																							
穴出口			穴出口																				
																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th>2010-001</th> <th>H</th> <th>W</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>表側(1方向材)</td> <td>0.03mm</td> <td>0.05mm</td> </tr> <tr> <td>裏側(織物材)</td> <td>0.05mm</td> <td>0.3mm</td> </tr> </tbody> </table>			2010-001	H	W	表側(1方向材)	0.03mm	0.05mm	裏側(織物材)	0.05mm	0.3mm	<table border="1"> <thead> <tr> <th>2010-002</th> <th>H</th> <th>W</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>表側(1方向材)</td> <td>0.08mm</td> <td>0.1mm</td> </tr> <tr> <td>裏側(織物材)</td> <td>0.1mm</td> <td>0.6mm</td> </tr> </tbody> </table>			2010-002	H	W	表側(1方向材)	0.08mm	0.1mm	裏側(織物材)	0.1mm	0.6mm
2010-001	H	W																					
表側(1方向材)	0.03mm	0.05mm																					
裏側(織物材)	0.05mm	0.3mm																					
2010-002	H	W																					
表側(1方向材)	0.08mm	0.1mm																					
裏側(織物材)	0.1mm	0.6mm																					

表 3

## 2-2-2 切削現象の研究 (CFRP+Ti+Al 複合型材穴加工の最適条件の研究)

SiC 単結晶の穿孔工具による CFRP+Ti+Al 複合型材の切削現象の研究のため NC フライス盤を使用して CFRP の穿孔実験を実施し切削動力計による切削抵抗の測定と表面あらさ計による穴内部の表面あらさ測定による解析を行った。

### ② 切削実験 No.2

#### ②-1 2010-001 型及び 2010-002 型ドリルによる CFRP+Ti+Al 材料の穿孔試験

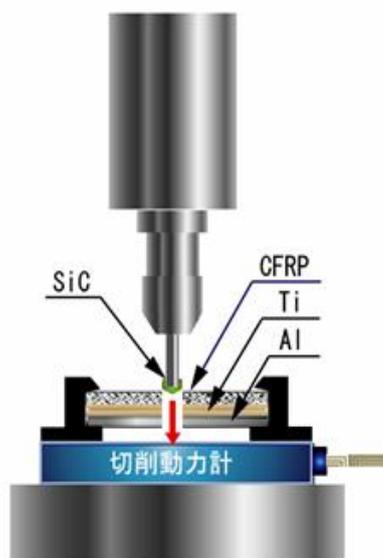


図 2

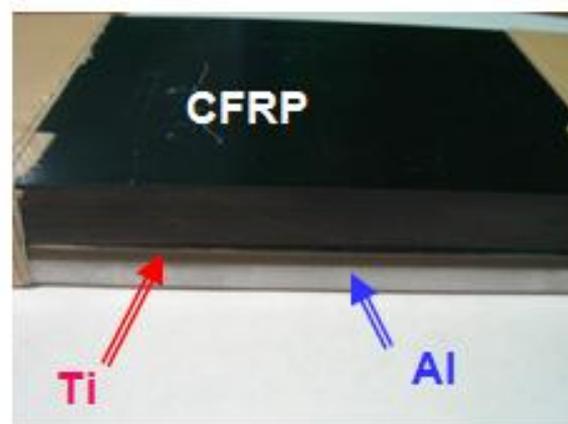
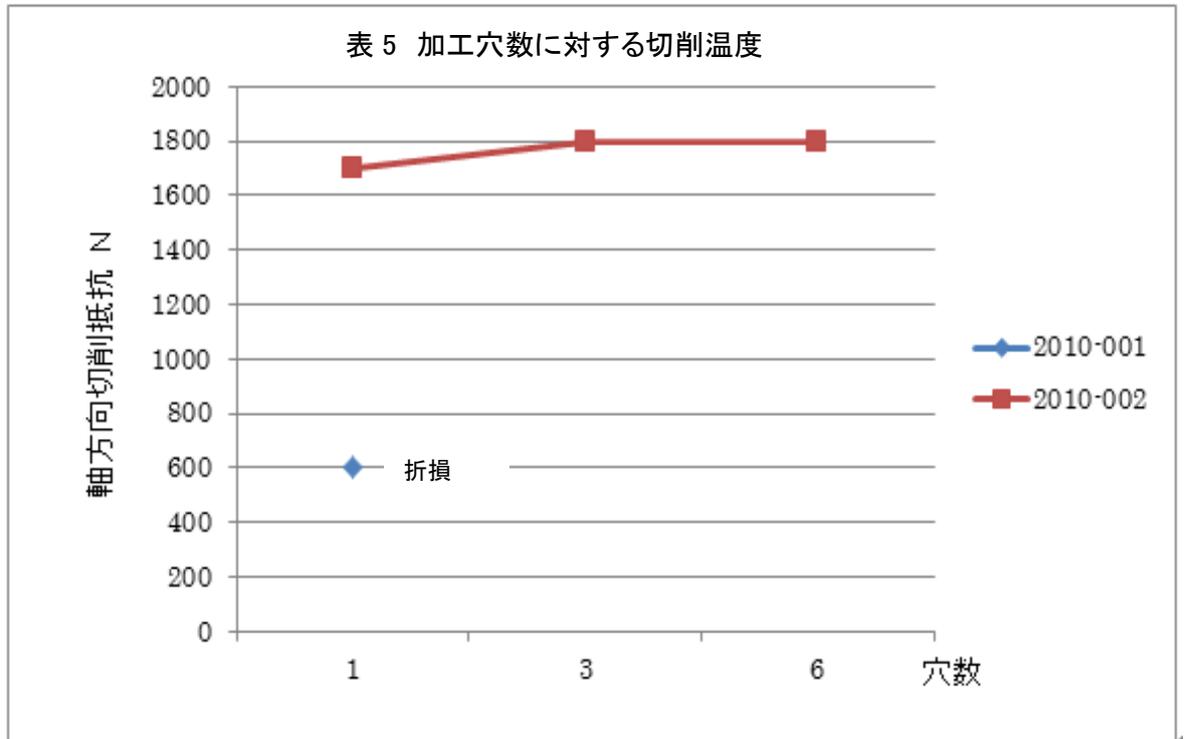
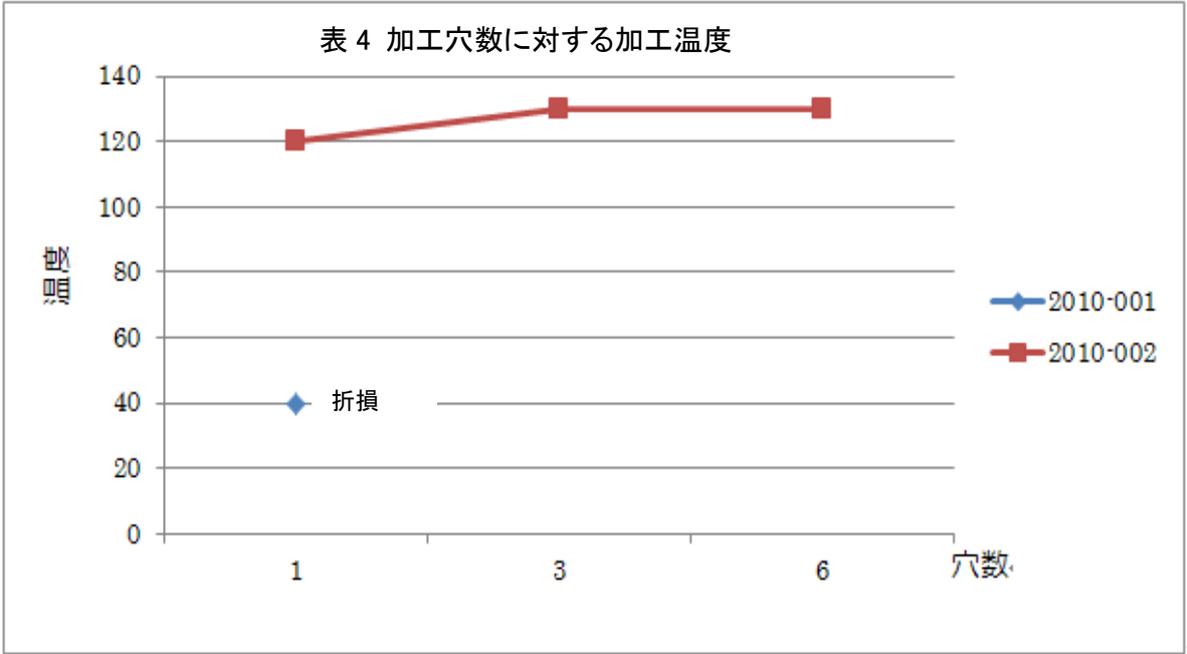


写真 2

図 2 の様にフライス盤のベッドに切削動力計を設置しその上に CFRP 材 (厚み 12mm) と  $\beta$  チタン (厚み 3mm) アルミ材 (厚み 5mm) を重ねた材料写真 2 を治具で取り付け、試作開発した筒状 1 枚刃 SiC 単結晶ドリル 2010-001 型、と 2010-002 型を使用した穿孔実験を行った。

切削条件は、回転数 1500rpm、送り 100mm/min

試験結果を表 4 (加工温度)、と表 5 (切削抵抗) に示す。



2010-001 型ドリル(001)と 2010-002 型ドリル(002)を同切削条件において CFRP+ $\beta$  チタン+アルミ材(写真 2)の穿孔実験を行った結果、001 のドリルは CFRP を貫通し $\beta$  チタン表面に接触した時点でシャンク部が破損した。原因は超硬(タングステン)シャンク部の強度不足と思われるが CFRP に比べ $\beta$  チタンの切削抵抗が大きい上に 001 のドリル刃先形状がフラットであったため切削抵抗にシャンクが絶えられなかったものと考えられる。本ドリルは切り屑を排出するために本体部が中空になっておりシャンク部の剛性は低いいため内径と外径の差を大きくし肉厚を厚くし SiC 単結晶の切れ刃形状を改良の必要がある。002 のドリルでも CFRP+ $\beta$  チタン+アルミ材の穿孔実験結果、切削抵抗値は CFRP 単体に比べ 1.5 倍程度、高いが切削温度の急激な上昇もなく加工できた。6 穴加工した SiC 単結晶の切れ刃部は表面(逃げ面)が磨り減って背当たり状態になっているがエッジ部の磨耗は無くこのまま 30 穴まで加工した切削抵抗、温度とも 6 穴目と粗同じであった。以上の実験結果から CFRP+ $\beta$  チタン+アルミ材の穿孔加工では 002 のドリル形状が有効と判断できた。表 6 に 001 と 002 のドリルで穿孔加工した CFRP+ $\beta$  チタン+アルミ材を示す。

ネジレ形状 SiC ドリルを使用した CFRP+Ti+Al の複合材料の加工穴

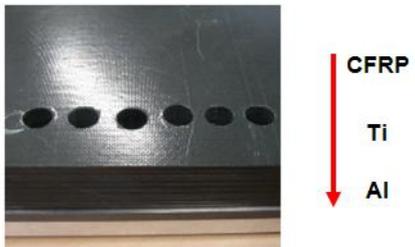
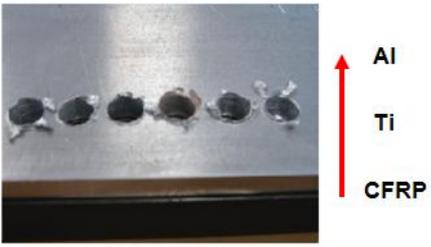
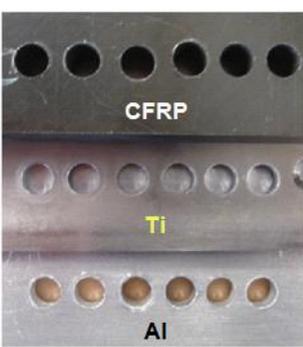
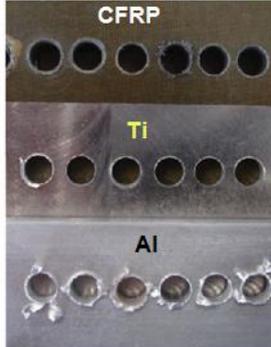
穴入り口	穴出口
	
	

表 6

2010-002 型を使用したとチタン・アルミの複合型材料の穿孔試験後の粗さ試験で CFRP に深い谷が発生するのは、素材の組成上のものと考えられる。その部分を除けば Ra は 2~3 $\mu$  m で板厚全長の断面曲線も 1 穴から 6 穴目まで変化なく安定している。二層目の Ti は 6 穴とも非常に良好な加工面状態で 1 $\mu$  mRa 前後の粗さになった。

③ 表面あらさ計による穴内部の表面あらさ測定による解析

③-1方法

ネジレ形状SiCドリルによる CFRP+Ti+Al 材料の穿孔試験(穿孔数 6)より各材料の  
 穴面粗さ測定 切削条件:回転数 1500rpm 送り 100mm/min

③-2. 結果

CFRP 材料(板厚 11.7 mm)

( $\mu\text{m}$ )

穿孔数	粗さ曲線から <u>(L=0.8mm×5=4.0mm)</u> *厚さの中央部			断面曲線から <u>(L=10.0mm)</u>
	Ra	Ry	Rz	Rmax(Pt)
1	1.6	11.3	7.6	26.1
2	3.2	20.9	18.3	53.1
3	2.8	16.5	10.5	179.9 *
4	2.0	11.2	7.3	48.4
5	3.8	27.6	21.6	60.2
6	1.8	10.7	7.1	33.3

Ti 材料 (板厚 2.9 mm)

( $\mu\text{m}$ )

穿孔数	粗さ曲線から <u>(L=0.8mm×3=2.4mm)</u>			断面曲線から <u>(L=2.4mm)</u>
	Ra	Ry	Rz	Rmax(Pt)
1	1.9	9.6	6.8	19.8
2	1.2	7.5	4.7	15.6
3	0.8	5.3	3.4	11.5
4	1.3	9.2	6.2	16.2
5	1.0	5.8	4.1	9.0
6	0.8	4.7	3.1	9.7

Al 材料 (板厚 4.9 mm)

( $\mu\text{m}$ )

穿孔数	粗さ曲線から <u>(L=0.8mm×5=4.0mm)</u>			断面曲線から <u>(L=4.0mm)</u>
	Ra	Ry	Rz	Rmax(Pt)
1	6.3	30.2	22.9	48.7
2	3.7	17.7	13.3	32.8
3	5.6	27.6	21.4	60.7
4	8.1	36.0	26.8	142.7 *
5	2.4	12.9	8.6	47.2
6	6.2	32.4	26.3	105.6

2-2-3 切削現象の研究 (CFRP 穴加工の最適条件の研究)

③ 切削実験 No.3 2010-001 型ドリルによる CFRP 材料の切削条件の分析

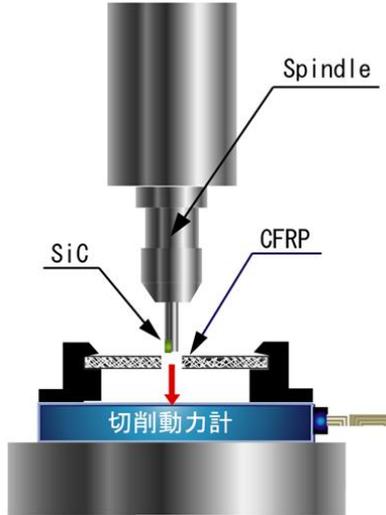


図3

図3の様にフライス盤のベッドに切削動力計を設置しその上に厚み12mmのCFRP材を治具に取り付け、2-2-1の実験でCFRP材穿孔に有効であった筒型ドリル2010-001型を使用して切削条件を変化させ穿孔実験を行った。

切削速度は25m/min, 50m/min, 125m/minで穿孔加工試験を行った。送り速度は実用的速度として375m/minで一定とした。

切削時の穴壁近傍の温度と切削抵抗を表7、加工後のCFRP材の穴出口の写真を表8に示す。

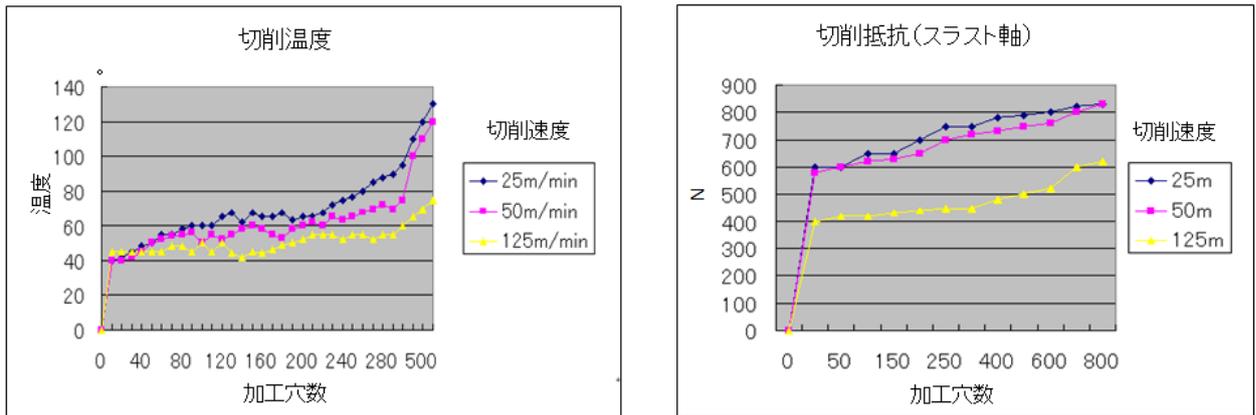


表7

切削速度 (m/min)	送り速度 (mm/min)	加工穴 (個)	穴出口の写真
25	375	500-504	
50	375	500-504	
125	375	500-504	

表8

## 2-2-4 切削現象の研究(CFRPトリム加工)

### ④ 切削実験 No.4 試作 SiC エンドミルによる CFRP トリム加工試験

- ・ SiC 単結晶のエンドミルによるCFRP材料のトリム加工の切削現象の研究のためNCフライス盤を使用してCFRPの側面切削実験を実施し切削動力計による切削抵抗の測定による解析を行った。

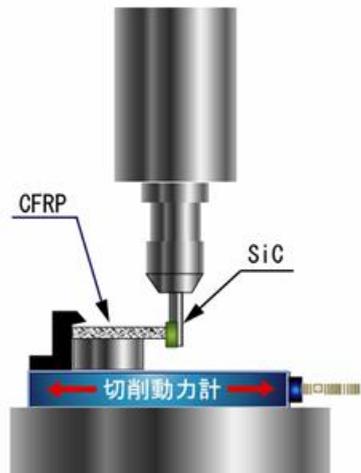


図 4

図 4 の様にフライス盤のベッドに切削動力計を設置し、その上に厚 12mm の CFRP 材を治具で取り付け、試作発した SiC 単結晶エンドミル EM001 型、(直径 8mm 刃数 1 枚)(写真 3)を使用した切削実験を行った。

切削条件は切 80m/min, 100m/min, 120m/min に変化させ、送りを実用的速度として 500mm/min 一定に設定し各 1500m 長を切削テストした。切削直後の壁近傍の温度と切削抵抗値を表 9 加工後の CFRP 材の写真を表 10 に示す。

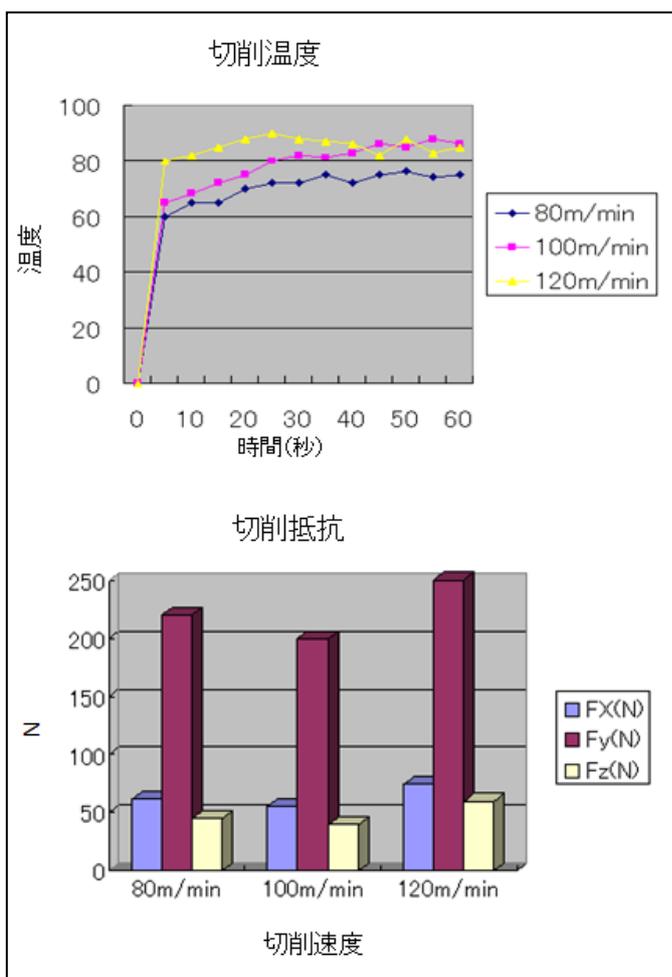


写真 3



表 9

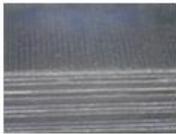
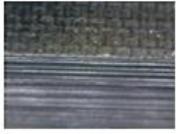
切削速度 (m/min)	送り速度 (mm/min)	加工長 (mm)	切削面 (上面)	切削面 (下面)
80	500	1500		
100	500	1500		
120	500	1500		

表 10

#### 2-2-5 切削現象の研究 ( $\beta$ -Ti 最適切削条件の研究)

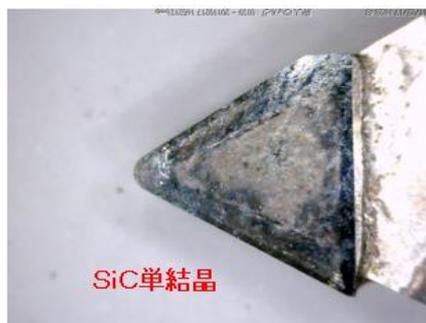
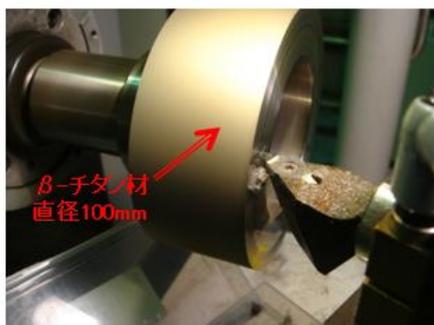
##### ⑤ 切削実験 No.5 SiC 単結晶チップを使用した $\beta$ -Ti 切削加工実験

写真 4 に示すように $\beta$  チタン材を SiC 単結晶チップで旋削加工実験をした。

切り込み量と切削速度を変化させて切削試験を行い $\beta$  チタンの最適切削条件を見出す。

切り込み量は  $1\mu\text{m}$  単位で切り込める。写真下は  $5\mu\text{m}$  と  $1\mu\text{m}$  の切り屑である。

## SiC単結晶チップを使用した $\beta$ -Ti切削加工



切り込み量 5 $\mu$



切り込み量 1 $\mu$

写真 4

切削速度63m/min 切り込み量5 $\mu$

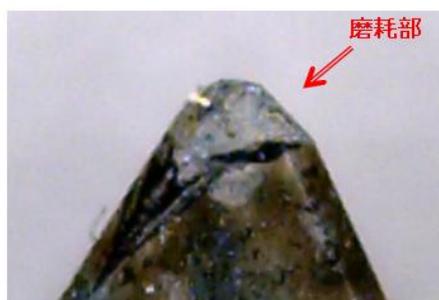
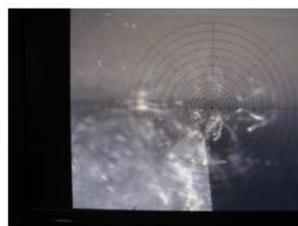
3.5Km 切削後（加工時間60分）



ワーク回転数



旋削加工中の $\beta$ チタン



使用後のSiC単結晶チップ刃先



$\beta$ チタンの切り屑

図 5

切削速度314m/min 切り込み量5 $\mu$

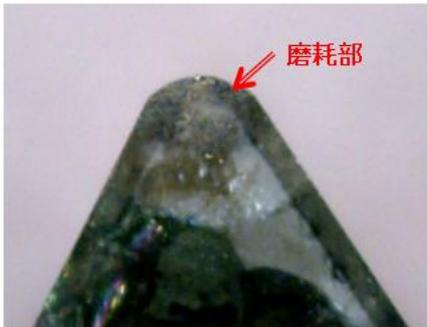
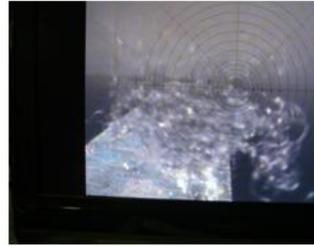
18Km 切削後（加工時間60分）



ワーク回転数



旋削加工中の $\beta$ チタン



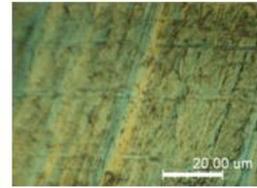
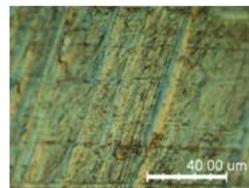
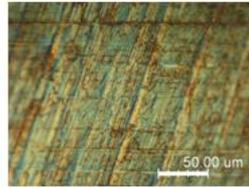
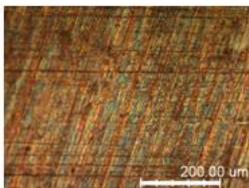
使用後のSiC単結晶チップ刃先



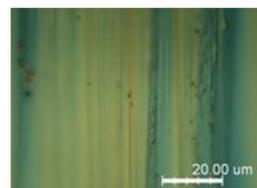
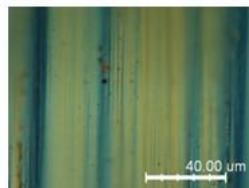
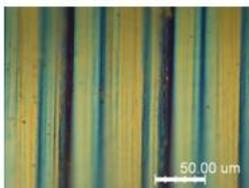
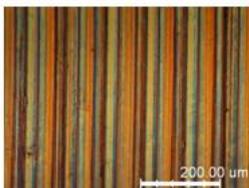
$\beta$ チタンの切り屑

図 6

従来工具(超硬)チップで切削したチタン表面



SiC単結晶チップで切削後のチタン表面 切削速度314m/min 切り込み量5 $\mu$



切り屑の表面状態

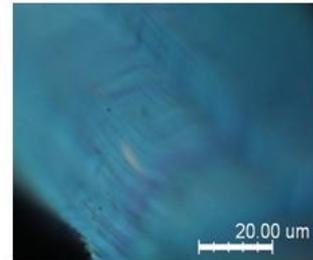
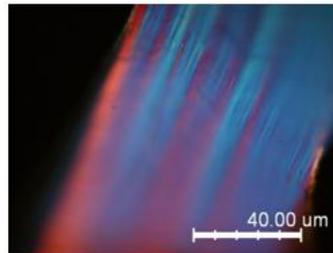
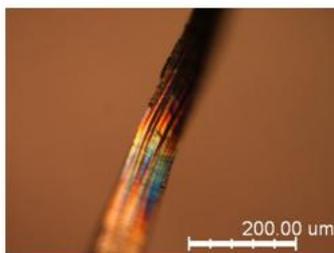


写真 5

従来工具(鋼、超硬合金)を使用したチタン材料の切削加工では切削条件の高速化により工具刃先に焼き付きや、振動が発生し加工面の表面粗さを大きくするのみではなく、表層から下部に向かって結晶歪み層を生み出し、その歪み層が酸化して材料破壊の基点となること、またダイヤモンド類工具(単結晶ダイヤモンド、多結晶ダイヤモンド等)を用いた場合にはチタン表面に生じる炭化チタン(TiC)などが形成されることによって部材の表面の変色を生むことが問題となっている。

本研究では SiC 単結晶チップを使用したβ チタンの旋削加工において、切り込み量を従来条件の 1/2(5μ m)に抑えることで切削面に無歪みに近い表面層を発現させる切削条件を発見した。切削した切り屑にも変質は無く、切り屑表面に安定した二酸化チタン(TiO<sub>2</sub>)を発現させることに成功した。切り込み量 5μ m として切削速度を変えてβ チタンの切削テストをした結果を図 5 と図 6 に示す。結果として切削速度を従来の 6 倍(314m/min)以上に速めるほうが SiC 単結晶の刃先が磨耗しにくい事も発見した。

写真 5 は従来工具とSiC単結晶チップで切削したチタン材料表面と切り屑に状態の写真である。切削した表面や切り屑にも変質層は殆ど発生していないことが分かる。

## 2-2-6 切削現象の研究(アルミ最適切削条件の研究)

### ⑥ 切削実験 No.6 SiC 単結晶チップを使用したアルミ材料の切削加工実験

切削速度255m/min 切り込み量0.3mm

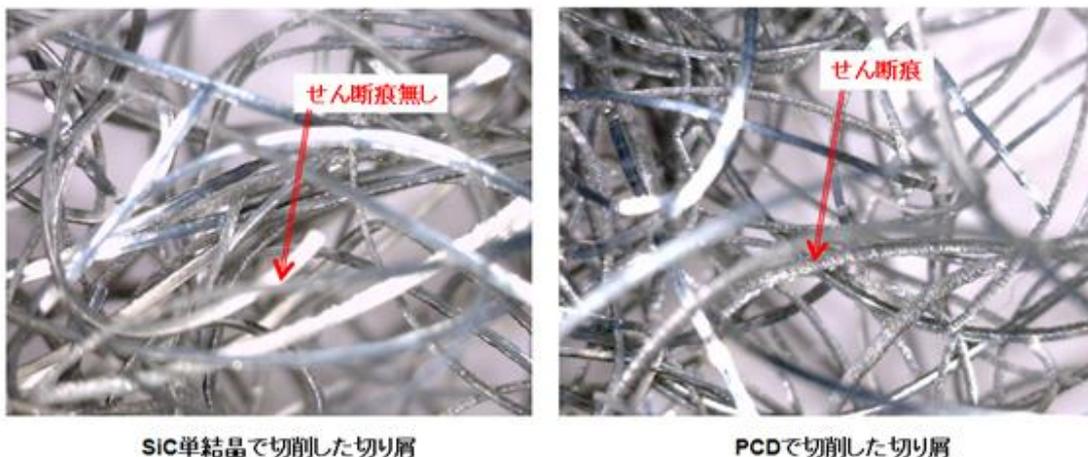


写真 6

アルミ製品の切削加工試験では乾式加工(切削油無し)で切削速度を従来工具(超硬)の 5 倍以上の高速加工においても溶着の発生は無く、従来のアルミ部品の品質以上の精度を実現出来ることを明らかにした。同条件で PCD 工具でも湿式加工では可能であったが乾式

では切削温度が上昇するため SiC と比較して極端に磨耗が速い。また切り屑にはせん断痕があり切削表面も悪化していた。SiC 単結晶で切削したアルミの切り屑は2-2-5で行ったチタンの切り屑と同様に変質は見られない。(写真 6)

### 2-3 研究成果

SiCドリル 2010-001 型(筒型)を使用した CFRP 穿孔実験を実施し、本ドリルでの穿孔加工において非常に安定した加工が可能な切削条件を見出した。実質 875 穴まで加工したが、切削抵抗、切削温度とも大きな変化はなく、SiC 単結晶ドリルの刃先部分に若干程度の磨耗が見られたがスクイ面及び外周面に磨耗は見られず、さらなる加工が可能であった。

SiCドリル 2010-002 型(ねじれ型)を使用したとチタン・アルミの複合型材料の穿孔試験後の粗さ試験で CFRP に深い谷が発生するのは、素材の組成上のものと考えられる。その部分を除けば Ra は 2~3 $\mu$  m で板厚全長の断面曲線も 1 穴から 6 穴目まで変化なく安定している。二層目の Ti は 6 穴とも非常に良好な加工面状態で 1 $\mu$  mRa 前後の粗さになっており製品の高品位性(安全性)を維持できる基本的な最適切削条件を明らかにした。これにより、従来の切削条件で発生していた加工歪みや金属疲労を発生させる切削応力を SiC 単結晶ドリルにより最小限に抑えた高能率加工が実用において可能とした。

さらに、CFRP 材料のトリム加工において、SiC 単結晶エンドミルを使用し、従来の切削に於いて多く発生したバリや、切削面の変質を大幅に抑制出来る条件を見出した。これにより、高品位な製品精度を維持した高能率加工を可能とした。

また、SiC 単結晶チップを使用した $\beta$  チタンの旋削加工において、切削面に無歪みに近い表面層を発現させる切削条件を発見した。切削した切り屑にも変質は無く、切り屑表面に安定した二酸化チタン(TiO<sub>2</sub>)を発現させることに成功した。

SiC単結晶チップを使用したアルミ製品の切削加工試験では従来のアルミ切削条件の 5 倍以上の高能率加工において、乾式加工でも従来のアルミ部品の品質以上の精度を実現出来ることを明らかにした。

## 第3章 適正切削工具の開発(材質について)

### 3-1 研究目的及び目標

#### 3-1-1 研究目的

新しい工具材料 SiC 単結晶の切削性能の分析を行なう。

CFRP 複合型材料の切削特性の違いに対応できる切削工具には、鋭い切れ味に加え、高い剛性が必要である。このように切削工具にとって相反する条件を満たすには、従来の焼結材料の工具では不可能である為、刃先の鋭利化が可能な単結晶材料を使用した工具の開発が必要となる。本研究では、単結晶工具の切削面(スクイ面など)に対して最強な結晶方位を分析する研究を行なう。今回開発する工具はシリコンカーバイド(SiC)の単結晶チップを工具切れ刃部に搭載した構造であり、その切れ刃先端のエッジ部は非常に鋭利になるため、切削抵抗の小さく高能率で高精度な切削加工が可能になる。

#### 3-1-2 研究目標

本年度は、SiC 単結晶工具の 3 次元超平坦化加工の量産化を実現できる製造工程を開発する。

### 3-2 実験方法

#### 3-2-1 SiC 単結晶工具の 3 次元超平坦化加工できる製造工程を開発

SiC 単結晶の本来の切れ味を実現するには刃先エッジ部の鋭利化が必要であり SiC 単結晶が物理的に可能である刃先 R 値は数ナノメートルであるが切削工具の切れ刃部は3次元形状を有するため、平面と曲面の平坦化(超研磨加工)が必要になる。SiC 単結晶の平坦化研磨方法として CMP 加工法が必要である。本研究では最適 CMP 加工法とその量産化を可能にする。

##### ① ベルト式研磨装置の開発

SiC チップのR逃げ面を研磨(CMP)するためベルト状にした不織布を回転させ研磨する装置を開発し、CMP 加工実験を行った。

研磨方法はベルト状に加工した。不織布を回転させ上部からSiC単結晶チップを食い込ませることでノーズ R 部分の逃げ面を研磨する。装置全体は水槽のような形状で溶液中染みこませたスラリーを攪拌させながら不織布に染みこませる。さらに SiC の研磨面にもポンプでスラリーを噴出する。

SiC 単結晶チップを取り付け固定出来る治具を開発した。一度に数枚のチップを固定出来るようにして量産を可能にした。

## ② SiC 単結晶工具の 3 次元超平坦化加工の実験

SiC 単結晶の刃先を構成する逃げ面を超研磨するめ、①で開発したベルト式研磨装置を使ってチップ固定治具に SiC 単結晶チップを5枚装着し CMP 研磨加工テストを実施した。

### ②-1 実験結果

図 7 の SEM 画像は、約1時間 CMP 研磨をした SiC 単結晶チップの先端エッジ部である。写真から解るように 5 枚全てのチップの切れ刃稜線に面ができています。特に SiC 側を表面に出した一番前のチップの面が大きく 0.02mm 程であった。

### ベルト研磨機で研磨したSiCチップの逃げ面のSEM解析画像

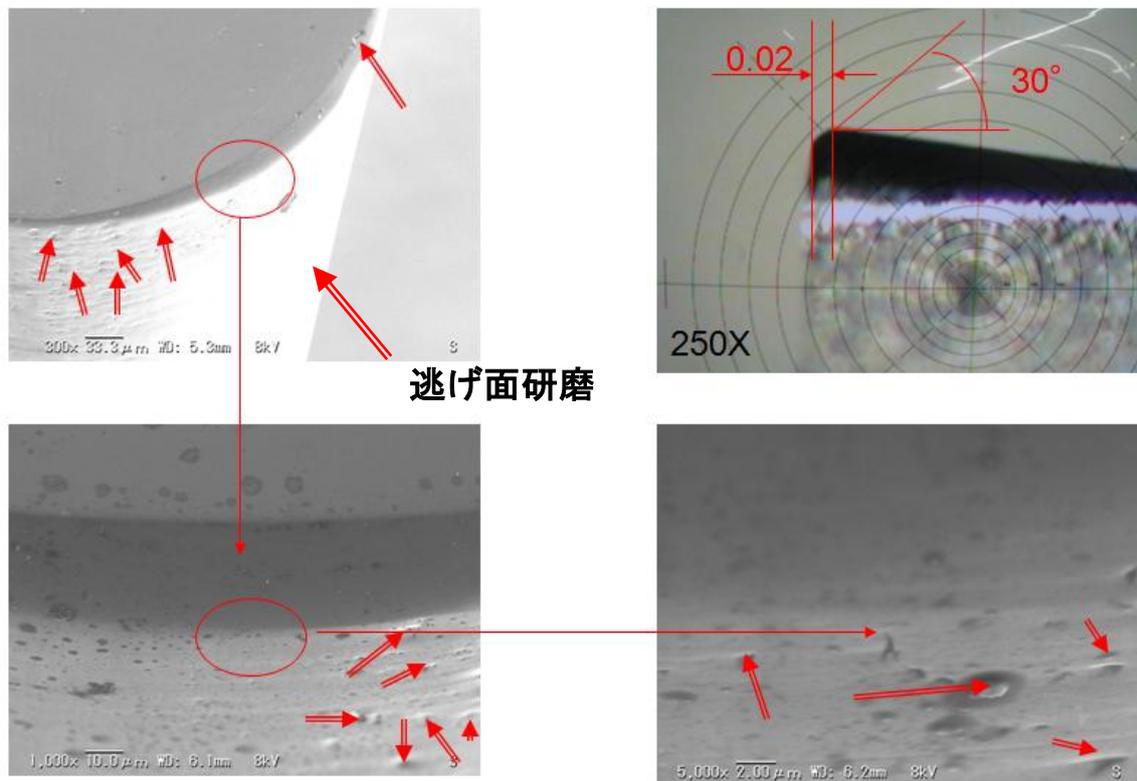


図 7

このSEM画像から ⇒ 部分に欠陥層(マイクロパイプ)が確認出来る。結晶の方向性により欠陥部を切れ刃エッジ部に発生させない方位を確立しているためエッジ部には欠陥部は現れていない。エッジ部の面を修正するには再度スクイ面をCMP加工することで可能と思われる。CMP加工の工程を逃げ面(本加工)から行うことで問題は解決できると考えられるが、我々はこの問題を解決する方法を以下のように考察し改良した。チップ固定治具にSiC単結晶チップを搭載する際にチップ母材どうしを重ねあわせるためネガチップ型の超硬母材の場合はヒールとSiC単結晶エッジ部が接触するためCMP加工時にその部分にスラリーが入り込みSiC単結晶エッジ部に面を形成する。またポジチップ型の場合はそれぞれのSiC単結晶エッジ部が突出するため不織布がエッジ部に丸みを形成する。以上の問題を解決する手段として、改良型チップ固定治具を開発した。

### ③ ベルト式研磨のチップ固定用治具改良型の設計と製造

改良した治具形状はSiC単結晶チップごとにホルダーを介して固定しチップ外側の両先端部に球形状の突き出したガイドを付けその球状先端部を調整式にしてSiC単結晶のエッジ部に不織布が接触する強さを調整できるようにした。

### ④ 改良型治具による SiC 単結晶チップの CMP 加工実験

③で設計した治具を使用し逃げ面の CMP 加工テストを実施した。

図 8 は 1 時間後の CMP 研磨後の SEM 画像である。改良型治具を使用することにより、この画像のように、SiC 単結晶のエッジ部に面が残らないことがわかった。

改良型治具で研磨したSiCチップ先端部の拡大画像

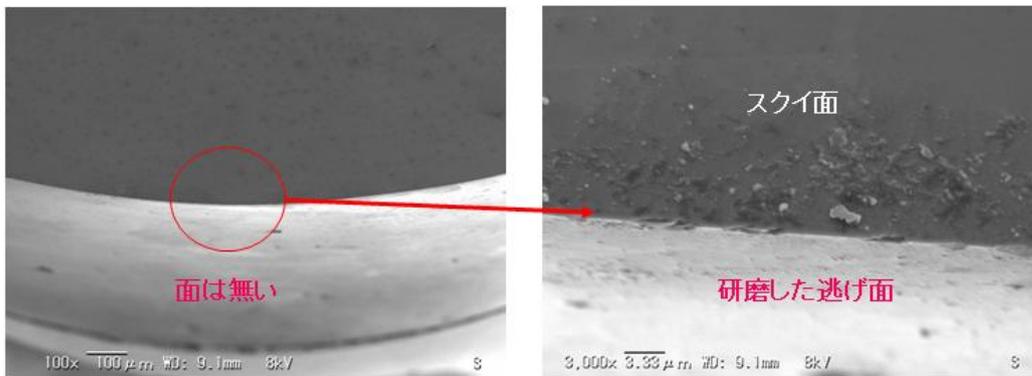


図 8

### ⑤ SiC 単結晶チップのスキイ面 CMP の量産治具の製作と試作研磨

SiC 単結晶チップのスキイ面用量産治具を開発。チップ母材の種類により、6 枚から 12 枚が一度に CMP 研磨加工できる。図 9 は CMP 後の SiC 単結晶チップである。

逃げ面とスキイ面を研磨したSiCチップの拡大画像

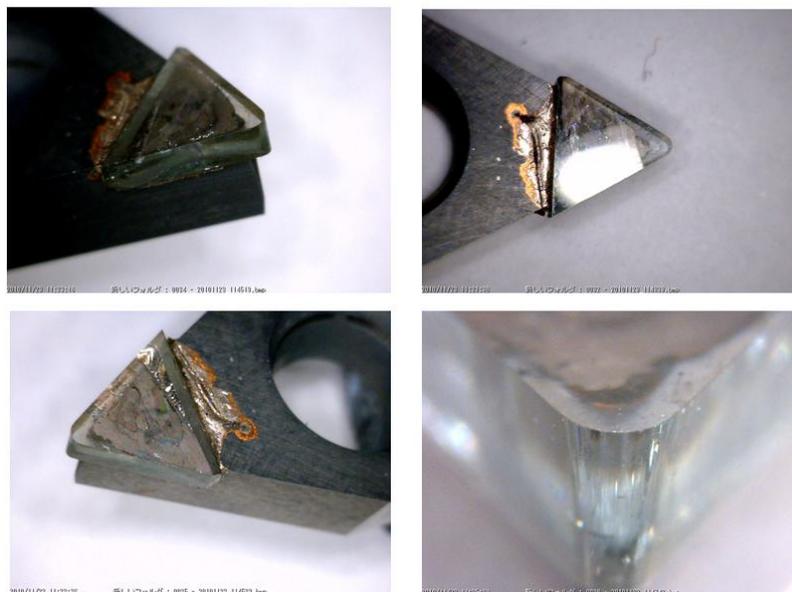


図 9

### ⑥SiC 単結晶の直接 CMP 研磨法

図 16 のように回転重り円盤に直接接着して CMP 研磨できるが接触面積が大きくなると加工時間が多くかかることが分かった。また SiC 単結晶の種類によっても CMP 加工時間が若干異なることが見られた。下表 11 に SiC 単結晶の面積及び種類による CMP 加工時間の違いを表した。

SiC単結晶No	単結晶面積	数量	CMP時間(H)
001	5X5	12	8
	10X20	3	25
002	5X5	12	8
	10X20	3	25
005	5X5	12	9
	10X20	3	28
006	5X5	12	9
	10X20	3	26
007	5X5	12	9
	10X20	3	26

表 11

### 3-3 研究成果

3次元 CMP 加工装置(ベルト式研磨装置)と量産治具を開発し、試作実験を行い SiC チップのR逃げ面の CMP 加工と量産化に成功した。

ベルト式研磨装置は SiC チップのR逃げ面を CMP 加工するためベルト状にした不織布にスラリーを染みこませ、回転させながら SiC 単結晶部を研磨する装置であり量産治具の改良により、量産化も可能にした。

また SiC 単結晶チップのスクイ面用量産治具を開発。チップ母材の種類により 6 枚から 12 枚 が一度に CMP 研磨加工できた。

さらにSiC単結晶の種類やCMP加工部の接触面積の大きさに加工時間に大幅な違いがあることを発見し最短時間で CMP 加工が可能になる指標を解明した。

## 第4章 切削工具の開発(工具形状について)

### 4-1 研究目的及び目標

#### 4-1-1 研究目的

SiC 切削工具の刃形状の開発および、精密かつ正確に研削できる研削方法を開発する。新しい工具素材シリコンカーバイド(SiC)の単結晶を使用した切削工具の最適工具形状(スキイ角・ネジレ角等)の研究開発、及び実切削実験による切削抵抗の解析と切削条件の研究開発を実施する。

#### 4-1-2 研究目標

本年度は、SiC 単結晶を搭載した CFRP 複合材料のトリム加工用エンドミル形状の開発と穿孔加工用ドリルの量産が可能な製造工程を開発する。

### 4-2 実験方法

4-2-1 CFRP 材の穿孔加工用、及び CFRP+Ti+Al 複合型材料加工用 SiC 単結晶ドリルの製造方法の開発及び CFRP のトリム加工用エンドミルの設計、製作を行った。

#### ① 筒型 SiCドリル 2010-001 型の形状の決定と製造方法の研究

開発製造した筒型 SiCドリル 2010-001 を製作した。超硬母材の切れ刃部に考案した冶具を使用して SiC 単結晶を筒状の先端と穴壁面の位置に正確にロー付できるようにした。ロー付後、刃部分を研削加工した。

#### ② ねじれ型 SiCドリル 2010-002 型の形状の決定と製造方法の研究

図 10 にねじれ型 SiCドリル 2010-002 型を示す。従来型のネジレ刃ドリルの先端部に SiC 単結晶をロー付し刃部分を研削により加工した。切削実験から、すくい角  $5^{\circ}$ 、逃げ角  $10^{\circ}$  に決定し直径 6.35mm のドリルで SiC 単結晶サイズを幅 7mm 長さ 5mm 厚み 2mm に決定した。またロー付前に両面のスキイ面の CMP 加工を施した SiC 単結晶活着して量産化を可能にした。

#### CFRP/Ti/Al 複合材の穿孔加工用 SiCドリル 2010-002 型



SiC単結晶サイズ 6.35X5X2  
逃げ角  $10^{\circ}$   
スキイ角  $5^{\circ}$

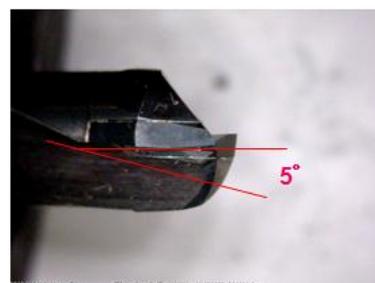


図 10

### ③ 筒型大径穴加工用 SiC ドリル 2010-003 型の設計と製造

2010-001 型ドリルと同構造で刃数は 3 枚刃とした。CFRP 材の大径穴加工用で、全長が長いこと超硬部分を 30mm としシャンク部はスチールで設計したスチールシャンク部分と超硬部分は焼きバメ方式で結合させる。先端部に SiC 単結晶を治具で正確にロー付し刃部分を研削により加工した。シャンク材料は SUS 系の材料で 400° 程度で膨張する材料を使用した。写真のヒートガンの熱で結合が可能である。

### ④ CFRP 材のトリム加工用エンドミルの開発

形状等は 2010-001 のドリルと同様に CFRP 材の切り屑を吸引出来る構造であり、SiC 単結晶の外周側の逃げ角を 12° 底刃の逃げ角は 5° とし、すくい角はロー付時に 10° 傾けて活着させた。SiC 単結晶部の刃長は 12mm に決定し試作品を製造した。

## 4-3 研究成果

CFRP の穿孔加工用 SiC ドリル 2010-001 型及び、CFRP/Ti/Al 複合材の穿孔加工用 SiC ドリル 2010-002 型を使用した 2-2-1 の切削テスト結果より工具のスペックを決定し、両者の製造工程を 3-2-1 の実験よりロー付前に CMP 加工を施した SiC 単結晶を新規に開発した治具を使って正確に活着できることで工具製造時間が短縮され量産化を可能にした。

また、CFRP/Ti/Al 複合材の大径穿孔加工用 SiC ドリル 2010-003 型を開発し試作した。筒型形状でシャンク部を SUS 材としたことで工具材料のコストを大幅に抑える事が可能になる。本ドリルは CFRP 加工メーカーで実用化に向け切削テスト中である。

さらに CFRP トリム加工用 SiC エンドミルを開発し試作した。本エンドミルは切り屑吸引が可能であり、トリムの切削加工時に排出される CFRP の粉塵量はドリル穿孔加工時の数倍以上になるため、切り屑飛散による作業現場の大幅な環境改善が望める。

## 第5章 全体総括

### 5-1 成果の総括

#### 5-1-1 SiC単結晶の素材加工について(研究項目2について)

前2年の研究開発において、3次元形状を有する刃先の CMP 加工に着手できていた。最終年度は製品開発のプロトタイプ創出を目指し研究開発を行った。特に、CMP 仕上がり具合と実加工試験の繰り返しによって、単結晶刀具として要求される CMP 仕上がり具合を明確にした。刃先形状形成における重要事項は次の2点に集約される。

1: 単結晶内部に刃形状形成時の加工歪を残留させないこと。これは超硬台座にろう付けする際において、刃物として被削材に接触する面のみならず、ろう付け面も CMP 加工されている必要があることである。この開発により、本報告2-2-5に示す Ti 材料への  $1\mu\text{m}$  切り込みにおいてもチップングを生じない、刃物素材開発に成功した。

2: 上述の  $1\mu\text{m}$  切り込みを実現するために、単結晶特有の壁開をし難くする結晶成長条件を見出したこと。これは CMP 速度仕上げ速度の低下を伴うが、刀具としての寿命を向上させるのみではなく、被削材との化学反応を低下させ、加工面歪を極小化させることにも貢献している。これにより本報告2章に示した加工抵抗の低減を実現した。

#### 5-1-2 工具形状と切削加工実験について(研究項目1、3について)

前2年の研究開発において、工具形状と被削材との関係について、実用加工レベルで試験を実施するところまで実現していた。本年度は外形の形状よりも、刃物材料内部の歪軽減及びろう付けの最適化に注力した。即ち、単結晶刃先だけではなく、超硬台座とろう付けされた最終形状を意識して開発を行った。

その結果、本報告4章に示す、穴あき形状ドリルの大型化を実現でき、本研究開発の目標であったCFRP材の単位時間あたりの高速切削を実現できた。また、協力者として参画頂いた三菱重工業株式会社 名古屋航空宇宙システム製作所殿において、航空機用 Ti材料及びアルミ材料の加工において実用レベルに達しているとの、実地試験に基づく意見を頂戴した。

刃先 CMP 仕上げの精度を向上させ、製品化開発まで着手することができたことは、我が国の加工製品の持つ価値を格段に向上させる。単に同品質を大量・安価・高速に製造するだけのベクトルであった製造業のアウトプットを、高付加価値・長寿命・安心安全をユーザーに約束できるモノづくりを実現できる刀具の実現した本研究は極めて画期的である。

## 5-2 工業所有権の取得状況及び対外発表等の状況

2010年10月28日(木)～11月2日(火)

東京ビッグサイト

2010 JIMTOF(日本国際機械見本市)

ビーティーティー株式会社 展示ブースにて、発表展示

2010年7月9日(金)

ポートメッセなごや

難加工展 2010

パネルディスカッション SiC単結晶刀具の解説

2011年1月18日(火)

ウインクあいち(愛知県産業労働センター)

中部ものづくり基盤技術展

ビーティーティー株式会社 展示ブースにて、発表展示

2011年1月27日(木)

名古屋工業大学講堂

日本トライボロジー学会

SiC刃物の技術と最新工具動向について講演