

2 軸回転砥石を用いた CFRP の新規穴あけ加工法の提案

柘植英明*1, 竹腰久仁雄*2, 山神成正*1, 加賀忠士*1, 坂東直行*1, 鎌倉光利*3, 渡辺義見*4

Novel drilling method for CFRP with dual-axes-driving grindstone

Hideaki TSUGE, Kunio TAKEKOSHI, Shigemasa YAMAGAMI, Tadashi KAGA,

Naoyuki BANDO, Mitsutoshi KAMAKURA and Yoshimi WATANABE

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の穴あけ加工において、2 軸回転砥石による新規穴あけ加工法(以降、ジャイロ式砥石穴あけ加工法)を提案し、その加工原理について説明する。また、その基礎的な加工特性を把握するために実験装置を製作し、CFRP の穴あけ加工実験を行った。その結果、ジャイロ式砥石穴あけ加工法におけるCFRPの穴あけ加工では、ケバや剥離がほとんどない良好の加工が行えることを確認した。また、加工条件については、穴あけ加工ができなくなる砥石周速の下限があるが、この下限値以上の砥石周速では砥石回転とジャイロ回転の比率や砥石周速の違いによる大きな影響は見られず、良好な穴あけ加工が可能であることを確認した。

Key words : CFRP, drilling machine, grindstone wheel, dual-axes-driving, gyro drilling

1. 緒言

現在、航空機や自動車産業を中心とした輸送機産業において、燃費向上等による CO₂ の排出量削減が喫緊の課題となっている。この課題に対する解決策として、機体や車体の軽量化が必要不可欠であり、軽量でかつ高強度の材料である炭素繊維強化プラスチック(以下、CFRP)の利用が注目されている¹⁾。

CFRP の穴あけ加工は主にドリルによって行われているが、ドリルの摩耗によって数 100 穴程度の加工で剥離や未切断の炭素繊維(ケバ)が生じるためにドリルの交換が必要となる^{2)~4)}。このため、ドリルの耐久性向上等を目指した研究が盛んに行なわれている^{5)~7)}。

ところで、砥石は非常に脆く、加工とともに消耗するために、磨きなどの仕上げ加工に用いられているが、CFRP の穴あけ加工に用いられた報告はない。しかし、ドリルと比べ非常に安価であり、ダイヤモンドや CBN などの非常に硬い砥粒を用いることにより難加工材の加工に応用できることが報告されている⁸⁾⁹⁾。そこで本研究では、CFRP の穴あけ加工として、ジ

ャイロ式砥石穴あけ加工法という新規の加工方法を提案する。この加工法の有効性を検証するために実験機を製作し、CFRP の穴あけ加工実験を行った。その結果、ジャイロ式砥石穴あけ加工法における加工条件および加工性能について知見を得たので報告する。

2. 実験方法

2.1 ジャイロ式砥石穴あけ加工

2.1.1 ジャイロ式砥石穴あけ加工法の原理

図1にジャイロ式砥石穴あけ加工法の原理図を示す。本加工法に使用する工具は、図1に示すような回転するシャフトの先端に円盤砥石が取り付けられているため、円盤砥石は砥石回転軸とシャフト回転軸の2軸によって回転運動を行う。この工具を被加工物に貫通させることによって穴あけを行う加工法のことをジャイロ式砥石穴あけ加工法と名付け、円盤砥石の

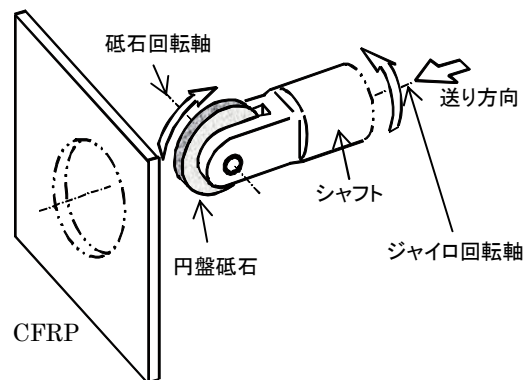


図1 ジャイロ式砥石穴あけ加工法の原理

*1 岐阜県機械材料研究所: 〒501-3265 岐阜県関市小瀬 1288

Research Institute for Machinery and Materials
Gifu Prefectural Government

*2 岐阜県産業経済振興センター: 〒500-8505 岐阜県岐阜市藪田南 5-14-53

Gifu Economic and Industrial Promotion Center

*3 岐阜県研究開発課: 〒500-8570 岐阜県岐阜市藪田南 2-1-1

Gifu Prefectural Research and Development Division

*4 名古屋工業大学: 〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区 御器所町

Nagoya Institute of Technology

<学会受付日: 2012 年 1 月 25 日>

回転を砥石回転, シャフト軸まわりの回転をジャイロ回転と定義する. 本加工法では切りくずが排出されやすいことと, 研削する砥石面が常に入れ替わるために, 工具の研削による加工熱が抑えられることが特徴となる. なお, 本研究では市販のビトリファイド砥石を用いて, CFRP にケバや剥離(デラミネーション)の少ない穴あけ加工の実現を目指す.

2. 1. 2 穴あけ加工実験システム

ジャイロ式砥石穴あけ加工法を実現するために試作した小型実験機の外観を図2に示す. この小型実験機は, 卓上旋盤(コスモキカイ(株), L-4000型)の往復台の上に, 自動送り機



図2 小型実験機の外観

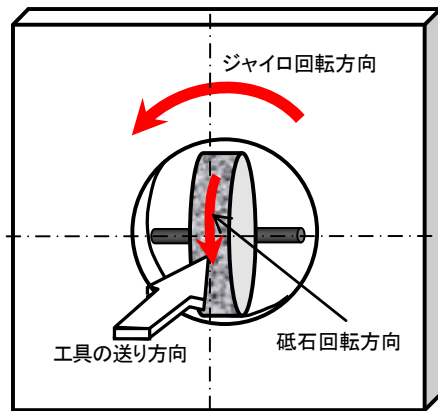


図3 小型実験機における砥石回転軸およびジャイロ回転軸の構成

能を有する円盤砥石が固定され, 主軸台には CFRP が固定できるようになっている. また, 粉塵の飛散を防ぐために, 主軸台をアクリル板によって覆い, 集塵機にて切りくずの集塵を行っている. 図3に小型実験機における砥石回転軸およびジャイロ回転軸の構成を示す. 本実験機では, 被加工材料である CFRP 自身を回転させることにより, CFRP の回転軸(ジャイロ回転軸)と円盤工具である砥石の回転軸(砥石回転軸)が直交するジャイロ式砥石穴あけ加工法を実現している. 小型実験機においては, ジャイロ回転数 $100\sim 2000\text{min}^{-1}$, 砥石回転数 $100\sim 5000\text{min}^{-1}$, 送り速度 $1\sim 50\text{mm/min}$ の範囲内で任意に加工条件を設定することができる.

2. 1. 3 砥石の種類

研削砥石の性能を決める主要要素としては, 砥粒の種類, 粒度, 結合剤(ボンド剤), 組織(砥粒率)および結合度(砥石強度)の5つの要素がある¹⁰⁾¹¹⁾. 本実験に用いた砥石の砥粒は, 黒色炭化ケイ素質研磨材(カーボラダム:C)と緑色炭化ケイ素質研磨材(グリーンカーボラダム:GC)を複合化したC/GC砥粒を用いた. 粒度は#70, #80および#100の3種類とし, 結合剤は砥粒の保持力と適度な自生作用をもつビトリファイド(V)とした. 組織は目づまり防止を目的として砥粒率が低くなるような粗な組織とし, 結合度は中間結合度(J, K, L)の内, #70および#80の砥石は結合度(L), #100の砥石は結合度(K)とした. 図4に, 小型実験機に使用した砥石の外観写真を示す. 砥石の直径は30mm, 厚さは5mmであり, 砥石の中心には12.7mmの穴があいている. この中央の穴にV溝ブリーが一体となったホイールを差し込み, エポキシ系接着剤によって

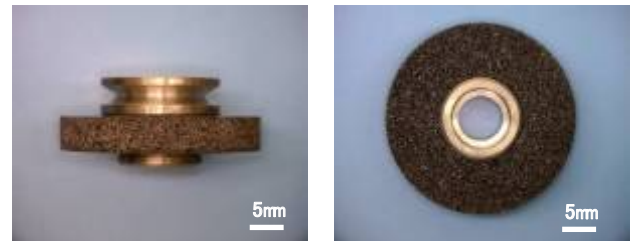
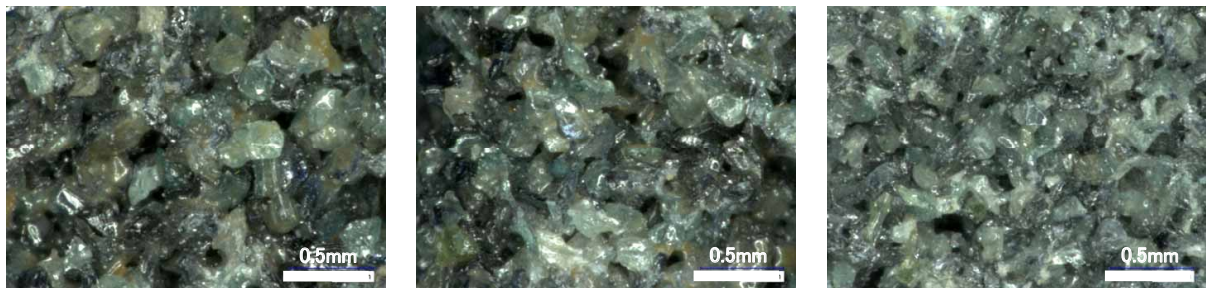


図4 砥石の外観写真



(a) C/GC-70

(b) C/GC-80

(c) C/GC-100

図5 砥石加工面の外観

砥石と接着している。実験に用いた#70, #80および#100の砥石表面の拡大写真を図5に示す。各砥石ともに、結合剤であるビトリファイドによって結合されたC/GC砥粒および気孔が確認できる。

2. 1. 4 被加工材料(CFRP)

本実験に用いたCFRPは、エポキシ樹脂を含浸させた厚さ0.25mmの一方向性炭素繊維プリプレグ(UDプリプレグ)を0/90°方向に40層積層し、オートクレーブにて加熱硬化させたものであり、加工実験に用いたCFRPの寸法は、100mm×100mm×5mmである。図6に、加工実験に用いたCFRPの断面写真を示す。

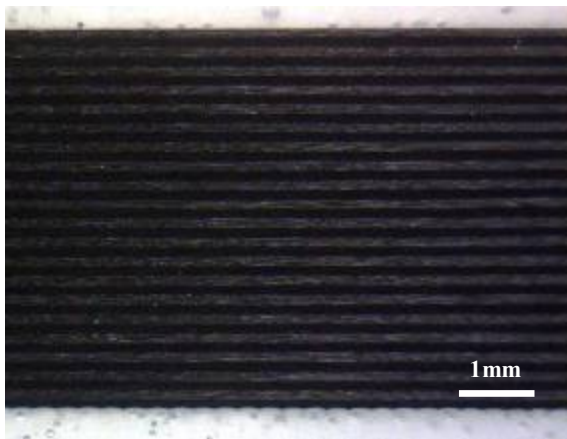


図6 CFRPの断面写真

2. 2 実験方法

2. 2. 1 送り速度の影響

提案するジャイロ式砥石穴あけ加工法における加工条件には、送り速度、砥石回転数、ジャイロ回転数および砥石の粒度等がある。しかし、本手法によるCFRPの穴あけ加工条件に関するデータは皆無であるため、砥石粒度と送り速度を変えてドライにより加工実験を行った。なお、加工穴数は1穴であり、砥石回転数およびジャイロ回転数は、小型実験機において最高回転数となる砥石回転数 5000min^{-1} 、ジャイロ回転数 2000min^{-1} に固定し、送り速度を5, 7.5, 10, 15および20mm/minと変化させた。使用したC/GC砥石の砥粒は#70, #80および#100の3種類である。実験は送り速度が低い条件から順に行い、加工が困難となって砥石回転モータが停止した時点で実験を中止した。加工面の表面粗さについては、テーラーホブソン社製表面粗さ測定機(フォームタリサーフシリーズS2)にて、データ長さ4.5mm, 測定点数4500点で評価した。

2. 2. 2 砥石回転数およびジャイロ回転数の影響

ジャイロ回転と砥石回転が加工に及ぼす影響を調べるために、砥石回転数を 1000min^{-1} , 2000min^{-1} , 3000min^{-1} , 4000min^{-1} および 5000min^{-1} 、ジャイロ回転数を 500min^{-1} , 1000min^{-1} および 2000min^{-1} と変化させてドライにより1穴の加工を行った。表面粗さは、上記と同様な装置および測定方法を用いた。なお、加工実験は砥粒が#100のC/GC砥石を用い、送り速度は5mm/minに固定した。

	送り速度			
	5mm/min	7.5mm/min	10mm/min	15mm/min
C/GC-70				
C/GC-80				×
C/GC-100			×	—

図7 CFRPの穴加工面写真(砥石回転数 5000min^{-1} 、ジャイロ回転数 2000min^{-1})

3. 実験結果および考察

3.1 送り速度の影響

図7は穴あけ加工後のCFRPの写真である。なお、図中の×印は加工ができなかったこと、—印はその条件での加工を行っていないことを意味する。送り速度が5mm/minおよび7.5mm/minのときは、砥石粒度に関係なく穴あけ加工を行うことができた。しかし、送り速度が10mm/minのときにC/GC-#100砥石、15mm/minのときにC/GC-#80砥石、20mm/minのときにC/GC-#70砥石において加工ができなくなった。これは、砥粒の小さな砥石ほど研削能力が低く、研削能力を超える送り速度になると砥石回転の加工負荷が砥石回転モータの許容回転トルクを超えるために、過負荷保護機能が働きモータ回転が停止すると考えられる。なお、砥石回

転モータの駆動力はベルトを介して砥石回転プーリに伝達されるが、このときの砥石の回転負荷トルクは、砥石回転モータの許容回転トルクから算出すると、約0.15N・mとなる。図7に示したCFRPの加工面を詳細に観察したところ、送り速度に関係なくケバや剥離がほとんど生じていない良好な加工面となっていることが確認できた。

図8に加工面の表面粗さ(Ra値)を示す。図に示すように、送り速度や砥粒の違いによる表面粗さの顕著な差異は見受けられなかった。ただし、C/GC-#70砥石については、送り速度が高くなるほど加工面の粗さが増加し、逆にC/GC-#80砥石およびC/GC-#100砥石については、送り速度が高くなるほど表面粗さが減少する傾向が見られた。本加工法における加工面粗さは、加工前の砥石エッジ部の状態および加工時における砥石エッジ部の欠けが大きな影響を及ぼす。これらの影響は複雑であるものの重要であるため、送り速度と加工面粗さの相関についての調査は、今後の課題と考えている。

穴あけ加工後の砥石加工面の写真を図9に示す。図中の—印はその条件での加工を行っていないこと、×印は加工ができないことを意味する。C/GC-#70砥石およびC/GC-#80砥石においては、送り速度が高くなるほど砥石の目づまりが増加する傾向にある。これは、送り速度が大きいほど単位時間当たりの研削量が増えるため、砥石の目づまりも多くなっていると考えられる。この目づまりによって加工負荷が徐々に増加し、加工途中に実験機が停止することになる。一方、C/GC-#100砥石については、目づまりが少ないにも関わらず加工ができなくなったのは、砥粒が細かいために送り速度に見合うだけの研削能力がなかったためであると考えられる。

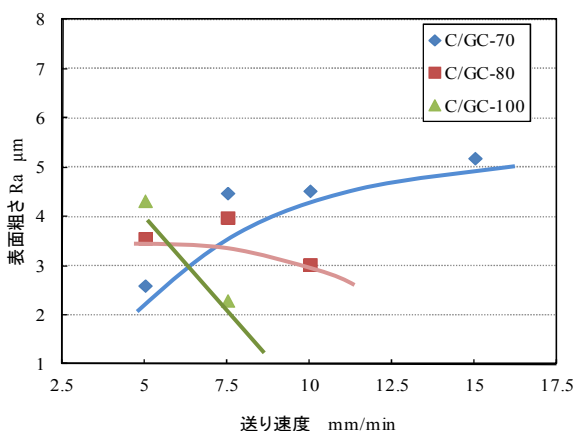


図8 送り速度による加工面粗さの変化(砥石回転数 5000min⁻¹, ジャイロ回転数 2000min⁻¹)

砥石粒度	送り速度(mm/min)			
	5mm/min	7.5mm/min	10mm/min	15 mm/min
C/GC-70				
C/GC-80				×
C/GC-100			×	—

図9 送り速度の違いによる穴あけ加工後の砥石表面(砥石回転数 5000min⁻¹, ジャイロ回転数 2000min⁻¹)


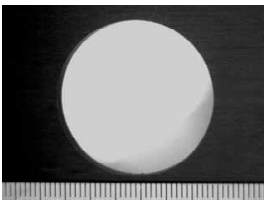


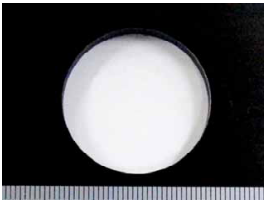


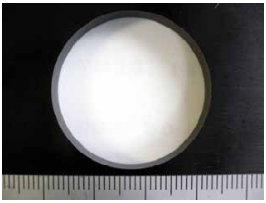
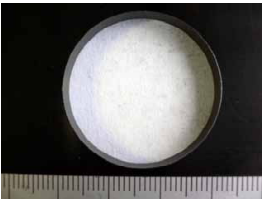
		ジャイロ回転数 min^{-1}		
		500	1000	2000
砥石回転数 min^{-1}	1000	—	—	× (211m/min)
	2000	—	× (211m/min)	× (267m/min)
	3000			
		(287m/min)	(298m/min)	(340m/min)
	4000			
	(380m/min)	(389m/min)	(421m/min)	
5000				
	(474m/min)	(481m/min)	(508m/min)	

図 10 砥石周速を変化させたときの穴あけ加工後の CFRP (送り速度 5mm/min)

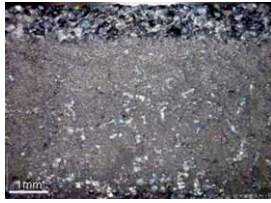
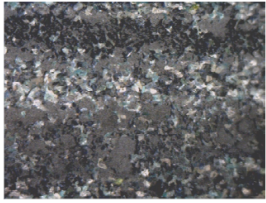
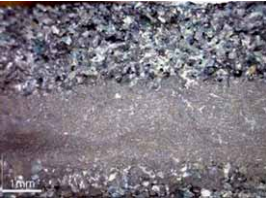
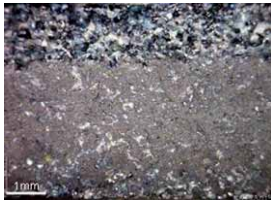
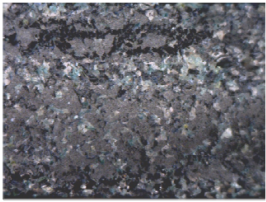
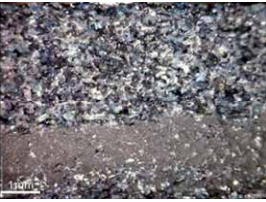
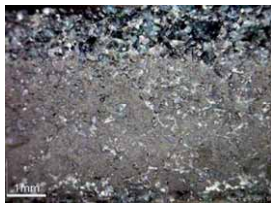
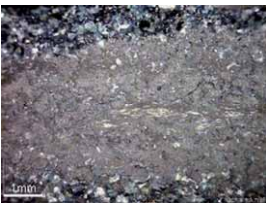
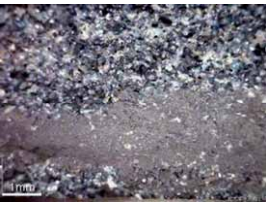
		ジャイロ回転数 min^{-1}		
		500	1000	2000
砥石回転数 min^{-1}	1000	—	—	× (211m/min)
	2000	—	× (211m/min)	× (267m/min)
	3000			
		(287m/min)	(298m/min)	(340m/min)
	4000			
	(380m/min)	(389m/min)	(421m/min)	
5000				
	(474m/min)	(481m/min)	(508m/min)	

図 11 砥石周速を変化させたときの穴あけ加工後の砥石表面 (送り速度 5mm/min)

3. 2 砥石回転およびジャイロ回転の影響

加工性能を評価するためには砥石の周速 V (m/min) を定義する必要がある。ジャイロ式砥石穴あけ加工法は 2 軸回転機構を有しているため、周速 V (m/min) は砥石回転数 T (min^{-1})、ジャイロ回転数 G (min^{-1}) および砥石直径 D (m) として、次式で求めることとした。

$$V = \sqrt{(T \times \pi \times D)^2 + (G \times \pi \times D)^2} \quad \dots (1)$$

図 10 に、C/GC-#100 の砥石を用い、送り速度を 5mm/min に固定し、砥石回転数を 1000 min^{-1} 、2000 min^{-1} 、3000 min^{-1} 、4000 min^{-1} および 5000 min^{-1} 、ジャイロ回転数を 500 min^{-1} 、1000 min^{-1} および 2000 min^{-1} と変化させて穴あけ加工した CFRP の外観写真を示す。砥石の周速が 267m/min 以下では加工を行うことはできなかったことから、砥石の周速が 267 m/min から 287m/min の間に加工の限界があることがわかる。また、砥石周速が 287m/min より高くなる加工条件では、砥石回転とジャイロ回転の比率に関係なく、バリや剥離のない良好な加工面となっており、砥石周速の相違による顕著な差は見られなかった。次に、穴あけ加工後の砥石加工面の写真を図 11 に示す。砥石の目づまりは、砥石回転数によって差違は見られないが、ジャイロ回転数が 2000 min^{-1} のときは 500 min^{-1} および 1000 min^{-1} と比べて目づまりの量がやや少ないことがわかる。このことから、砥石の目づまりはジャイロ回転によって抑えられていると考えられる。加工面粗さについては、図 12 に示すように砥石周速が 481m/min までは砥石の周速に影響を受けていないが、508m/min では加工面粗さが約 2 倍になっている。また、加工穴の真円度は、周速が 481m/min までは

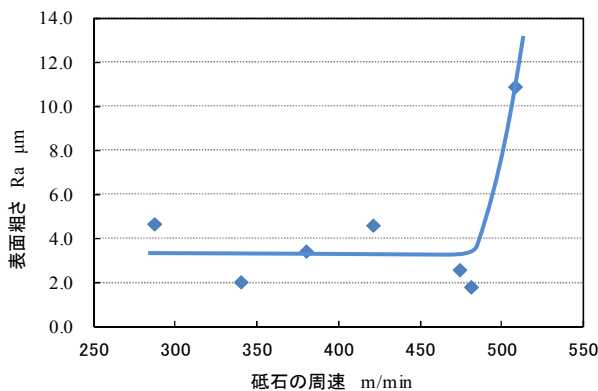
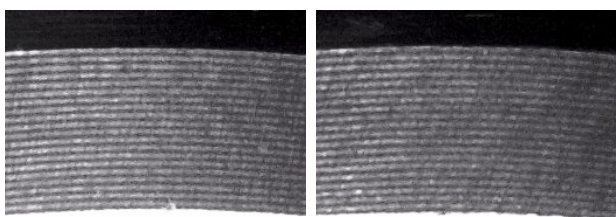


図 12 周速による加工面粗さの変化(送り速度 5mm/min)



(a) 周速:287m/min (b) 周速:508m/min

図 13 加工穴内面の写真

1.8~2.9 μm であるが、周速が 508m/min においては 4.6 μm となっており、加工面粗さと同様な傾向を示した。しかし、周速が 287m/min および 508m/min の加工穴内面の写真(図 13)からは、両者に顕著な差が見られず、周速が 508m/min において加工面粗さおよび真円度が悪くなる原因については今後検討する必要がある。また、複数穴加工数による砥石の耐久性についても今後検討する予定である。さらに、加工穴径が砥石サイズから計算した穴径よりも最大で 0.8mm 大きくなっているが、これは試作機の機械的精度が原因と考えられる。この現象解明のために、ジャイロ式加工機実機の開発についても現在行っており、追って結果を報告する予定である。

4. 結言

CFRP への新たな穴あけ加工法として、ジャイロ式砥石穴あけ加工法を提案し以下の結論を得た。

- 1) ジャイロ式砥石穴あけ加工法による CFRP の穴あけ加工は、ケバや剥離がない良好な穴あけ加工が行えることを確認した。
- 2) ジャイロ式砥石穴あけ加工法においては、砥石粒径が大きいほど高い送り速度で穴あけ加工を行うことができる。また、加工面粗さについては、砥石の粒度によって、送り速度の影響は異なる。
- 3) ジャイロ式砥石穴あけ加工法では、穴あけ加工が行えなくなる砥石周速の下限があるが、この下限値以上では砥石回転とジャイロ回転の比率に関係なく、良好な穴あけ加工が可能である。

謝辞

本研究は、文部科学省、地域イノベーション戦略支援プログラム(グローバル型)「東海広域ナノテクものづくりクラスター」において行われた研究成果の一部である。ここに感謝の意を表します。

5. 参考文献

- 1) 前田豊：炭素繊維の応用と市場、シーエムシー出版、(2008) 103.
- 2) 柳下福蔵、複合材料(CFRP)の穴あけ加工技術、機械と工具、工業調査会、(2007) 24.
- 3) 酒井康貴：CFRP・チタンおよび複合材料における穴あけ加工の革新技術、機械と工具、工業調査会、(2009) 10.
- 4) 滝川義寛：CFRP の切削加工、機械と工具、工業調査会、(2009) 16.
- 5) S.HANASAKI et al: Study on Tool Wear Mechanism of CFRP Cutting II, Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., C, 71, 702, (2005-2) 365(in Japanese).
- 6) H.Yagishita: Cutting Mechanism of Drilling CFRP Laminates and Effect of Ultrasonic Torsional Mode Vibration Cutting, Trans. NAMRI/SME, 34, (2006) 213.
- 7) H.Yagishita: Comparing Drilling and Circular Milling for Hole Making in CFRP Laminates, Tran. NAMRI/SME, 35, (2007) 153.
- 8) T.TASIRO et al: Formation mechanism of ground surface of CFRP, J.Jpn.Soc.Abras.Technol.,49,2,(2005) 99(in Japanese).
- 9) Y.WATANABE, E.MIURA, H.SATO: Fabrication of Functionally Graded Materials by Centrifugal Slurry-Pouring Method and Centrifugal Mixed-Powder Method, J.Jpn.Soc.Powder Powder Metal., 57, 5, (2010) 321(in Japanese).
- 10) 河村末久ほか：切削加工と砥粒加工、共立出版株式会社、(1991) 4.
- 11) (社)砥粒加工学会編、砥粒加工技術のすべて、(2006) 22.