

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月4日現在

機関番号：54401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560136

研究課題名（和文） CFRP/チタン スタックの精密穴加工

研究課題名（英文） Precision drilling of CFRP/Ti stacks

研究代表者

田代 徹也（TASHIRO TETSUYA）

大阪府立大学工業高等専門学校・総合工学システムコース・准教授

研究者番号：00322628

研究成果の概要（和文）：TiN/AlN コーテッド超硬ドリルと TiAlCr/TiSi コーテッド超硬ドリルを用いて、CFRP/チタン合金の重ね合わせ材の穴加工を行った。様々な実験条件のうち、送り速度を小さくすることが工具寿命の点では有効であった。工具の選択においては、TiAlCr/TiSi コーテッド超硬ドリルの方が工具寿命が長かった。乾式加工と水ミスト冷却加工との比較も行った。その結果、約 50 個以下の穴加工までは、水ミスト冷却の方がドリル摩耗は小さいがそれ以上になると、切りくずの凝着が突発的に発生し、それ以降は摩耗が急激に大きくなった。

研究成果の概要（英文）：Drilling experiments of CFRP/Ti6Al4V laminated stack board were carried out use of a TiN/AlN-coated cemented carbide drill and a TiAlCr/TiSi-coated cemented carbide drill. In the experimental conditions described herein, tool life is longer for lowered feed speed, and a TiAlCr/TiSi-coated cemented carbide drill has longer life than the other. Additionally, the cooling performance between dry process and water-mist-cooling were compared. For a number of holes less than 50, water-mist-cooling reduces tool abrasion. However, the abrasion increases suddenly for hole numbers greater than 50.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：生産工学・加工学

キーワード：穴加工，難削材，切削，CFRP，チタン合金

1. 研究開始当初の背景

最新の旅客機では、CFRP 材料の使用量が増加し 50wt%にも達している。また、アルミ合金に代わってチタン合金の使用量も増加している。さらに、CFRP 材料と他の材料を接触させて構造材とする場合、チタン合金は様々な点で CFRP との相性が良い。このため、CFRP とチタン合金を重ね合わせて構造材とした

ものを同時に穴加工する頻度が増えてきている。しかし、CFRP、チタン合金とも難削材として知られており、工具摩耗が激しい。また、これら材料の適した穴加工条件は確立されておらず、適した工具の選択も必要であった。また、これら2つを重ね合わせ材料を同時に穴加工する研究は海外でわずかにあるものの、国内では系統だてた研究は行われて

いなかった。しかし、国内でこの材料の切削、穴加工の需要が急激に増えてきている。

2. 研究の目的

CFRP とチタン合金の重ね合わせた材料を同時に穴加工するために適した工具の選択および穴加工条件を見出すことが主な目的である。具体的には、工具寿命、加工穴の精度や性状について検討した。ただし、産業界においては加工効率も重要であるため、この点も合わせて考慮する必要がある。

3. 研究の方法

(1) CFRP とチタン合金を重ね合わせて、種々のドリルを用いて穴加工を行った。CFRP に適した工具とチタン合金に適した工具をそれぞれ選択し、その後、同時穴加工実験を行った。まず、ハイスコーテッドドリルを使用した。しかし、チタン合金の切りくずの凝着が激しく、超硬コーテッドドリルの方が工具寿命は長かった。そのため、超硬コーテッドドリルを用いて実験を行った。

(2) 工具摩耗は主にチタン合金の加工時に激しかったため、チタン合金の穴加工に適した切削速度、送り速度とした。CFRP の切削加工では、切削油を使用せず乾式加工が推奨されており、そのため CFRP とチタン合金の重ね合わせ材においても乾式加工で実験を行った。

(3) ただし、冷却効果を検討するために、油を使用しない水のみをドリル先端から供給した実験も行った。さらに、ドリル先端から冷風を供給する実験も行い冷却効果を検討した。

(4) 以上のように、段階的に加工条件を絞りながら、加工穴の寸法精度や加工穴内壁の状態を観察し、より適した加工条件を検討した。最終的には以下の要領で実験を行った。

(5) 実験にはマシニングセンタ(大阪機工, PCV40)を使用した。工具にはTiN/AlNコーテッド超硬ドリルおよびTiAlCr/TiSiコーテッド超硬ドリルの2種類を用いた。TiN/AlNコーティングは膜硬度が約35GPaであり、TiAlCr/TiSiコーティングは膜硬度が約50GPaである。TiAlCr/TiSiコーティングは膜硬度がTiN/AlNコーティングよりも硬いだけでなく、シリコンとクロムが添加されているため、耐摩耗性、耐熱性、耐溶着性に優れていると考えられる。

図1に示すように板厚3 mmのCFRPと板厚9.5mmのTi-6Al-4Vを上側がCFRP板となるように重ね合わせたものを被削材とし、垂直方向に貫通穴あけ加工を行った。ここで、CFRPは炭素繊維クロス10層と最下層にガラス繊維ク

ロス1層を積層したものである。穴加工中に被削材にかかるスラスト力とトルク値を測定した。また、一定回数ごとにドリルの逃げ面摩耗幅の測定および加工穴の観察を行った。ドリルの逃げ面摩耗幅が0.2 mmに達した時を工具寿命とし実験を終了した。切削条件を表1に示す。

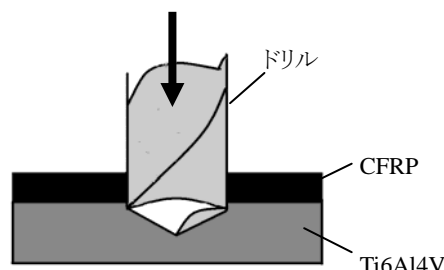


図1 CFRP/Ti6Al4V スタック材

表1 実験条件

被削材	CFRP (3 mm)/Ti6Al4V (9.5 mm) (CFRP:炭素繊維クロス10層+ガラス繊維クロス1層)
ドリル	TiN/AlN コーテッド超硬 (φ6 mm) 膜強度: 約 35GPa TiAlCr/TiSi コーテッド超硬 (φ6 mm), 膜強度: 約 50GPa
切削速度 V	9.4, 18.8 m/min
送り f	0.1, 0.2 mm/rev
切削油剤	乾式, 水ミスト (水, 100 mL/h)

4. 研究成果

(1) 切削抵抗について

穴加工中の切削抵抗を測定した。具体的にはドリル送り方向のスラスト力と、ドリル回転方向のトルクを測定した。加工中に得られた切削抵抗の波形よりスラスト力、トルク値の最大値を求め、切削条件ごとにまとめた結果を図2にCFRP部分とチタン合金部分とに分けて示す。破線より上側がTi合金部であり、下側がCFRP部である。また、図中においては、工具の種類はTiN/AlNをTiAlNと、TiAlCr/TiSiをTiAlCrSiと、それぞれ表記する。図中の実験条件に水と表示したものは水ミストを供給した場合であり、これ以外はすべて乾式である。切削速度はいずれも18.8m/minである。TiN/AlNコーテッドドリルについては、送り速度0.1mm/rev に設定した実験も行った。この条件の場合工具寿命が最も長く、270個目で逃

げ面摩耗が0.2mmに達した。この条件以外は、送り速度を0.2mm/revの同一条件とした。

CFRP部分については、スラスト力、トルク値ともいずれの条件でも大きな差は表れなかった。チタン合金部分については、図2(a)のスラスト力は、TiN/AlNコーテッドドリルを用い、乾式で送り $f=0.1\text{mm/rev}$ の場合に最も小さくなった。送り速度 $f=0.2\text{mm/rev}$ の場合、コーティングの種類が変わってもスラスト力に差は現れなかった。TiAlCr/TiSiコーテッドドリルに水ミストを供給した場合、スラスト力は乾式と比べると初期の値から全体的に小さくなった。

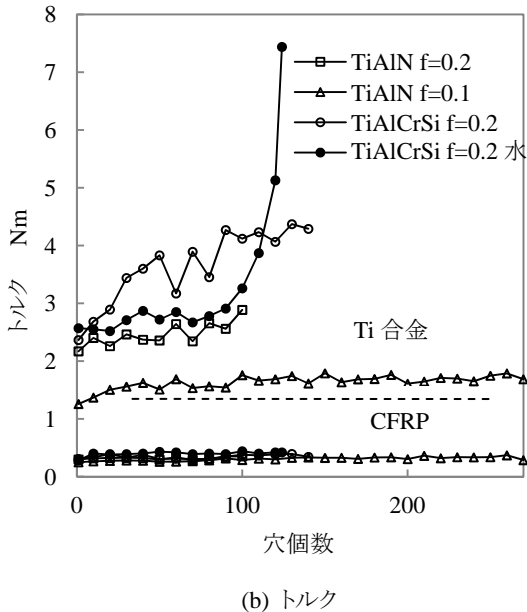
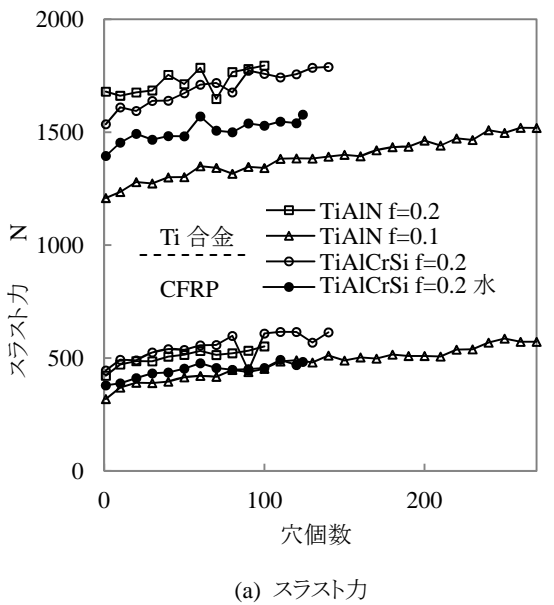


図2 切削抵抗の測定結果

図2(b)のトルク値については、スラスト力の場合と同様、TiN/AlNコーテッドドリルを用い、乾式で送り $f=0.1\text{mm/rev}$ の場合に最も小さくなった。送り速度 $f=0.2\text{mm/rev}$ の場合、TiN/AlNコーテッドドリルを用いた方が、トルク値は小さくなった。また、TiAlCr/TiSiコーテッドドリルに水ミストを用いた場合には、トルク値は穴個数が110個目までは乾式の場合よりも小さい値であったが、110個目以降で急激に大きくなった。

(2) 工具摩耗について

逃げ面の工具摩耗曲線を図3に示す。送り速度が遅い $f=0.1\text{mm/rev}$ ($V=18.8\text{m/min}$, TiAlNコーティング)の場合が最も工具寿命が長くなった。これと同じ加工条件において、上述したスラスト力とトルク値は加工回数とともに緩やかに上昇し、工具摩耗の進行も加工回数とともに緩やかに上昇していることから、工具摩耗がスラスト力、トルク値と大きな関連があると考えられる。TiAlNコーテッドドリルを用いた場合の結果より、この工具においては送り速度を $f=0.2\text{mm/rev}$ ($V=18.8\text{m/min}$) \rightarrow 0.1mm/rev ($V=18.8\text{m/min}$)に小さくする方が、切削速度 V を 9.4m/min ($f=0.2\text{mm/rev}$)に小さくするよりも工具寿命に対しては効果があると考えられる。

TiN/AlNコーテッドとTiAlCr/TiSiコーテッドの2種類のドリルを比較すると、切削速度 $V=18.8\text{m/min}$ 、送り速度 $f=0.2\text{mm/rev}$ の同じ加工条件ではTiAlCr/TiSiコーテッドドリルの方が工具寿命は長くなった。TiAlCr/TiSiコーティングの方が膜強度が大きく、CrやSiの添加により、耐摩耗性が向上したことが理由として考えられる。また、TiN/AlNコーテッドドリルでは、送り速度が 0.2mm/rev と速い場合、ある程度の摩耗量になるとその後の摩耗の増加が急激であったことも工具寿命に差が生じた原因である。

TiAlCr/TiSiコーテッドドリルの場合、工具寿命は乾式で140回、水ミスト供給した場合は124回であった。水ミスト供給を供給した場合は初期摩耗が小さく、摩耗の進行の割合は乾式の場合と同様であり穴個数が50個までは摩耗幅が小さかった。しかし、50個目以降は摩耗が増加し、100回目以降は摩耗の増加の割合が急激に大きくなり、125個目でドリルが折れた。水ミストによる冷却効果については、摩耗の進行が小さいものの突発的な現象がおこる結果となった。

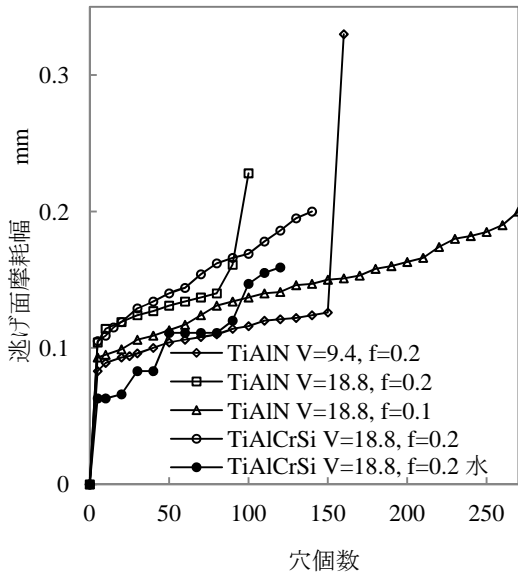
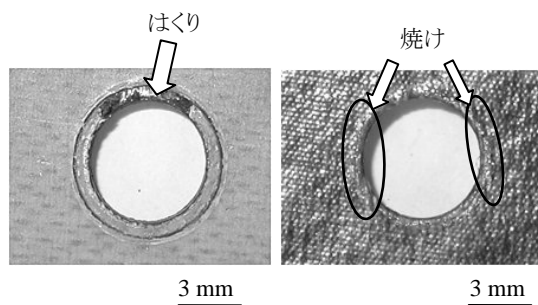


図3 工具逃げ面摩耗

(3) CFRP 穴加工部のはくりにについて

次に、工具摩耗と CFRP の穴の状態との関連について調べた。TiAlCr/TiSi コーテッドドリルを用い、切削速度 18.8 m/min, 送り 0.2 mm/rev, 乾式加工の場合の工具寿命付近、すなわち 120 個目における CFRP の加工穴の表面写真を図 4 に示す。CFRP の加工穴の入口側に層間剥離によって加工穴表面の層がリング状に持ち上げられてはくりしていることがわかる。また穴出口側では層間ははくりおよびエポキシ樹脂の焼けが見られた。このように工具摩耗の増加とともに CFRP の穴の入口付近や出口付近において、はくりや焼けなどの損傷が生じることがわかった。



(a) CFRP 穴入口側 (b) CFRP 穴出口側

TiAlCr/TiSi コーテッドドリル, 乾式,
V=18.8 m/min, f=0.2 mm/rev, 120 個目

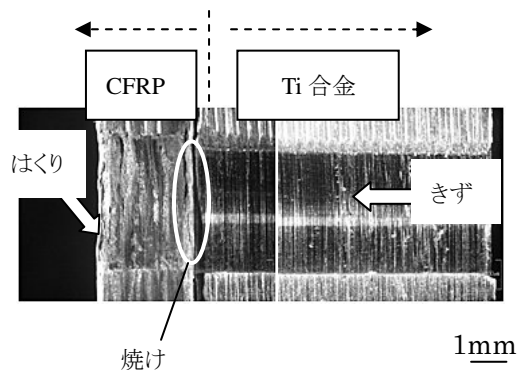
図4 CFRP 材の損傷

焼けのあった部分は、チタン合金と接触している部分であり、チタン合金の加工によって生じた切削熱の影響を受けたものと考えられる。

(4) 加工穴内部の観察と寸法精度の比較

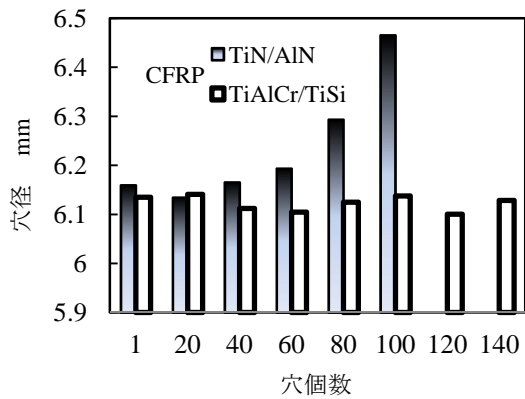
加工穴内部の観察を行った。一例として、TiAlCr/TiSi コーテッドドリルを用い、乾式で切削速度 $V=18.8$ m/min, 送り速度 $f=0.2$ mm/rev, 穴個数が 100 個目における加工穴の切断写真を図 5 に示す。100 個目では、工具摩耗が大きくなっている場合の加工状態であり、矢印で示すようにチタン部分の不規則なキズや CFRP 部のはくりが観察でき、CFRP とチタン合金の合わせ面付近では CFRP に焼けが生じていた。また、穴径が異なっていることが確認できた。

そこで、この加工条件において CFRP 部分およびチタン合金部分の穴径を測定し、コーティングの異なる 2 種類のドリル(直径 6mm)の比較を行った。キャリパー型内側マイクロメータ(ミツトヨ製 IMP-30MB)で測定した結果を図 6 に示す。CFRP については各穴の最小値部分を測定した。チタン合金については、穴出口での測定結果である。CFRP 部分では、TiAlN コーテッドドリルの方が穴径は大きくなった。とくに TiAlN コーテッドドリルの工具寿命付近である 100 穴目においては穴径が 6.4mm 以上となり、工具摩耗の影響が大きく表れたと考えられる。チタン合金部分については、コーティングの違いによる穴径の違いは大きいところでも 15 μ m 程度であり、ほとんど差はなかった。

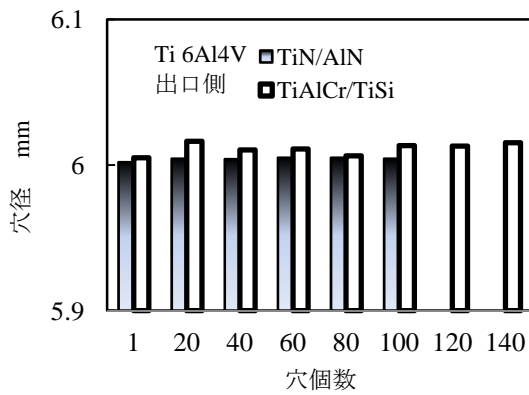


TiAlCr/TiSi コーテッドドリル, 乾式, V=18.8 m/min,
送り $f=0.2$ mm/rev, 100 個目

図5 穴内壁の観察写真



(a) CFRP 部の穴直径



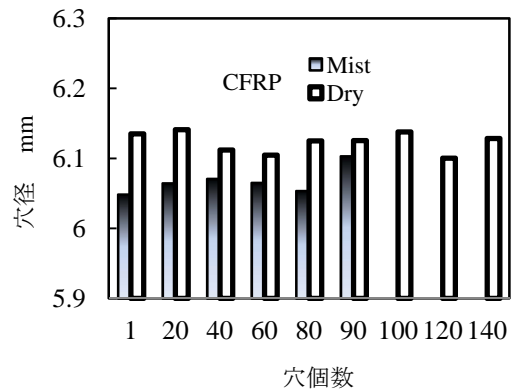
(b) Ti6Al4V 出口部の穴直径

$V=18.8 \text{ m/min}, f=0.2 \text{ mm/rev}$, 乾式

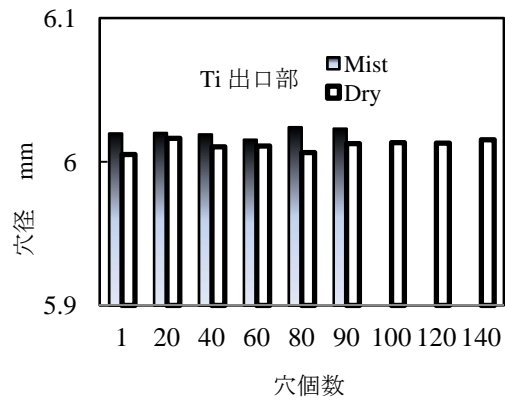
図6 コーティングの違いによる各部の穴直径

(5) 乾式加工と水ミスト冷却の比較

TiAlCr/TiSi コーテッドドリルを用いた場合の水ミスト冷却の影響について、加工穴の直径で比較した。測定結果を図7に示す。加工条件は、切削速度 $V=18.8 \text{ m/min}$ 、送り速度 $f=0.2 \text{ mm/rev}$ 、各ドリルの直径は 6 mm である。水ミストを用いた場合、CFRP 部分では乾式の場合よりも穴の拡大率は減少した。CFRP に対しては冷却することにより切削温度の上昇が抑制され、母材であるエポキシ樹脂が軟化されなかったことが理由として考えられる。一方、チタン合金部分については、水ミストを用いた場合の方が大きくなったが、その差はわずかであった。



(a) CFRP 部の穴直径



(b) Ti6Al4V 出口部の穴直径

$V=18.8 \text{ m/min}, f=0.2 \text{ mm/rev}$,
TiAlCr/TiSi コーティング

図7 水ミスト供給した加工穴直径の測定結果

加工穴を観察した結果、水ミストではCFRPの焼けが改善されチタン合金の加工穴内面のきず等もほとんどなく良好な表面状態であった。トルク値は水ミストを用いた場合、90穴目以降で大きくなったが、これは図8の(b)のように、ドリル先端から軸方向に約 4 mm の所に切りくずの凝着が見られ、切りくずづまりのような状態になっていたからである。切りくずは本来ドリルのねじれ溝に沿いながら加工穴内壁に当たってカールし、ねじれ溝を通して排出されるが、水ミストで切削温度が下がると、切りくずが曲がりにくくなり、ねじれ溝に沿ってらせん状に曲がらず、凝着したものと考えられる。そのためドリル先端の左右の切れ刃の切削量にアンバランスが生じ、摩耗量が増大したと考えられる。

水ミスト供給した時のチタン合金の切りくずの写真を図9に示す。切りくずの形状は穴あけ加工の初期にはらせん形切りくず、中期にはらせん形切りくずがつまったジグザグ型切りくず、貫通時には長ピッチ切りくずが見られた。切りくずの最大長さは132 mmであった。最後に排出された長い切りくずはドリルの溝に絡まっていた。また乾式で得られた切りくずは、形状は図9とほぼ同様の状態であるが、水ミストを供給した場合は乾式で得られた切りくずよりも曲がりにくくなった。チタン合金の内面は水ミストを用いた方が良好であり、CFRPの穴径は水ミストを用いた方が精度がよい結果であったが、CFRPの穴の内壁の表面性状は必ずしも良好ではなく、穴個数によらず、きずやはくりが生じることがあった。

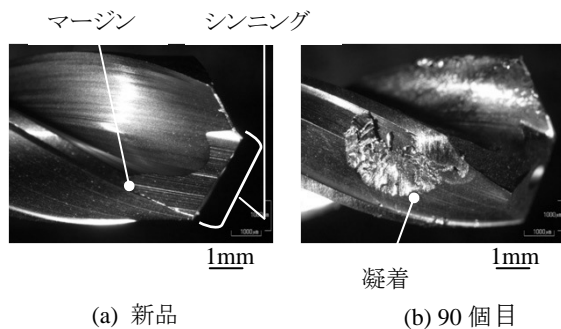


図8 ドリルに凝着したチタン合金の切りくず

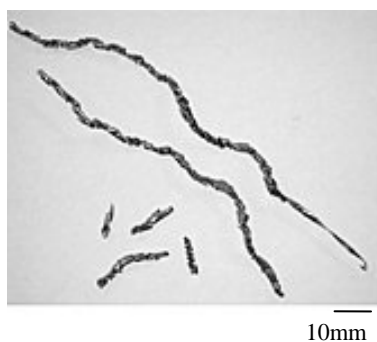


図9 水ミスト使用時のチタン合金の切りくず

(6) 研究成果の国内外における位置づけ

国内では CFRP/チタン合金スタック材の同時穴加工は、ほとんど報告が見られず、製造者は、それぞれ独自のノウハウで加工を行っているのが現状である。

国外では、ドイツを中心に本研究課題と同

様の研究が行われていて、その成果が航空機の製造に活用されているようである。本研究課題の成果をドイツで開催された国際会議で発表したところ、ブレーメン大学の研究者が発表内容に大変興味をもたれ、情報交換や、最新の研究成果が掲載された研究論文の出版を教授していただくなどの交流を持つことができた。

(7) 今後の展望

本研究課題に適すると考えられるドリルは、いまだ開発途中である。工具の製造者らとも情報交換を行い、工具を試作しながら系統的に研究を継続することが必要である。特に、チタン合金の切りくず処理が最も大事な課題である。また、加工効率の検討も必要だと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① Tetsuya Tashiro, Junsuke Fujiwara and Keiko Inada : Drilling of CFRP/Ti-6Al-4V stacks, *Advanced Materials Research*, 査読有, Vol. 325, (2011) 369.
- ② 田代 徹也, 藤原 順介, 稲田 景子 : CFRP/Ti-6Al-4V スタック材の穴加工, 砥粒加工学会誌, 査読有, (掲載決定).

〔学会発表〕(計3件)

- ① 長浦 龍一, 藤原 順介, 田代 徹也 : CFRP と Ti-6Al-4V のスタック材の穴あけ加工, 日本機械学会関西支部講演会, 平成 24 年 3 月 17 日, 関西大学.
- ② 稲田 景子, 藤原 順介, 田代 徹也 : CFRP と チタン合金の重ね合わせ材の穴あけ加工, 日本機械学会関西支部講演会, 平成 23 年 3 月 19 日, 京都工芸繊維大学.
- ③ 田代 徹也, 下津屋 貴文, 藤原 順介 : CFRP/Ti-6Al-4V スタック材の穴加工, 日本機械学会関西支部講演会, 平成 22 年 3 月 17 日, 神戸大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田代 徹也 (TASHIRO TETSUYA)

大阪府立大学工業高等専門学校・総合工学システム学科・准教授

研究者番号: 00322628

(2) 研究分担者

藤原 順介 (FUJIWARA JUNSUKE)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 60116093