

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11日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560130

研究課題名（和文）エンドミルによるサファイアの微細切削技術の開発

研究課題名（英文）Micro Milling of Sapphire

研究代表者

松村 隆 (MATSUMURA TAKASHI)

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号：20199855

研究成果の概要（和文）：特殊、極限環境下で使用されるサファイアデバイスの製造技術として、微細切削技術を開発した。六方晶のサファイアの平削りとエンドミル切削では、結晶面および結晶軸に対する切削方向によって切削特性が異なる。また、エンドミル切削では脆性損傷とともに仕上げ面に対する切りくずの溶着が問題であり、これらを考慮した切削条件を選定しなければならない。分割切込みによって、溶着に起因する仕上げ面粗さの劣化を抑えることが可能である。

研究成果の概要（英文）：Micro cutting of sapphire is studied to manufacture micro devices used in special environments at extremely high pressures and/or temperatures. Because sapphire is a hexagonal crystal material, the cutting force and the critical cutting depth, the maximum depth in which crack-free surfaces are finished, depends on the crystal plane and the cutting direction with respect to the crystal axis. In milling of sapphire, brittle fracture and adhesion of the surface finish should be considered in determination of the cutting conditions. The adhesion of material is reduced by the decomposed process, in which the cutting depth is given incrementally.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：サファイア、切削、エンドミル、硬脆材料、脆性損傷、溶着

1. 研究開始当初の背景

機械的強度、熱特性、化学的安定性、透過性に優れているサファイアは、現在、高輝度LED基板、プロジェクター用ヒートシンク、腕時計カバーガラス、極限環境窓、ノズル、ガイドなど機械部品、検査治具に幅広く利用

されている。これらの応用では、主にサファイア平板に対するものが多く、これらの製造では、ベルヌーイ法やチョクラスキー法で製造した単結晶材料を切断し研磨する加工に留まっていた。しかし、近年では、化学プラント、環境、海洋・宇宙開発の分野などの

極限環境における分析機器のデバイスや部品としてのニーズが増え、これまでの平坦化プロセスから微細形状加工への展開が望まれている。

サファイアの微細加工としては、従来、熱リン酸によるウェットエッチング、ダイヤモンド砥石による研削、レーザー加工が試みられている。エッチング加工は、極めて危険な熱燐酸を使用しなければならないため、メーカーでもこの加工法を適用している例は少ない。また、レーザー加工では、除去した材料が仕上げ面やその周辺に融着するため、これを剥がすための二次工程が必要となる。

一方、サファイアと同様の硬脆材料であるガラスやシリコンに対しては、それらを脆性損傷なく切削するための研究開発がなされてきた。したがって、サファイアも切削により三次元形状が自在に加工できれば、市場に対してサファイア部品をより安価で柔軟に提供できる。

2. 研究の目的

本研究では、サファイアの微細部品の切削技術を開発することを目的としている。サファイアと石英ガラスの物性値の比較を表1に示す。加工の観点から、サファイアの特徴を記すと、

- 機械的強度が極めて高い。
- Al_2O_3 を主成分とする六方晶結晶体であり、結晶面で特性が異なる異方性材料。

サファイアがガラスと異なる点は、異方性を有することである。すなわち、本研究ではサファイアの結晶面に対する切削特性の評価が、特筆すべき課題である。また、微細部品の実用的な加工を対象として溝深さは $10\ \mu\text{m}$ 以上とし、加工面にき裂を残さずに切削できる技術を開発する。

表1 サファイアと石英ガラスの特性

	サファイア	石英ガラス
硬度(Vickers)	22.5GPa	8.9GPa
曲げ強度	690 MPa	94.3 MPa
引張り強度	2250 MPa	49 MPa
圧縮強度	2950MPa	130MPa
溶融点	2053°C	1720°C
熱伝導率(20°C)	42Wm/K	1.38WM/K
電気抵抗(25°C)	$10^{14}\ \Omega\ \text{cm}$	$10^{17}\ \Omega\ \text{cm}$

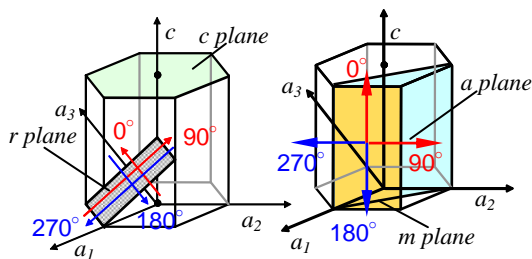


図1 サファイアの結晶面

3. 研究の方法

本研究では、高効率で高品位なサファイアの微細切削を対象とし、切削加工機を開発し、その切削特性を明らかにする。サファイアは、図1に示す六方晶結晶体である。 $a\{11\bar{2}0\}$ 、 $c\{0001\}$ 、 $m\{10\bar{1}0\}$ 、 $r\{01\bar{1}2\}$ の結晶面があり、機械的および化学的特性が異なる。そこで、異方性を考慮してサファイアの切削に関する以下の特性を明らかにし、実用的な切削技術を確立する。

- (1) き裂発生および進展特性
ダイヤモンド圧子による押込み試験により、き裂発生時の垂直応力を測定する。
- (2) 平削りにおける切削特性
平削り切削において、仕上げ面に脆性損傷がなく延性的に切削できる(延性モード切削)の最大の切込み量を実験的に測定し、材料の異方性が切削特性に及ぼす影響を明らかにする。
- (3) エンドミルにおける加工特性
エンドミル切削により、各結晶面に対する切削特性を明らかにし、良好な仕上げ面が得られる切削条件と切削工程を示す。

4. 研究成果

4.1 サファイアの脆性損傷特性

脆性材料における切削では、被削面にき裂が進展しないように除去しなければならない。そこで、押込み試験によりき裂発生時の応力を調べた。図2の試験機は、動力計を取り付けた耐荷重 150N、分解能 8nm のテーブルが上昇し、上部の梁に取り付けたビッカース圧子をテーブル上の試験片に押し込むものである。また、試験片の裏側には AE セン

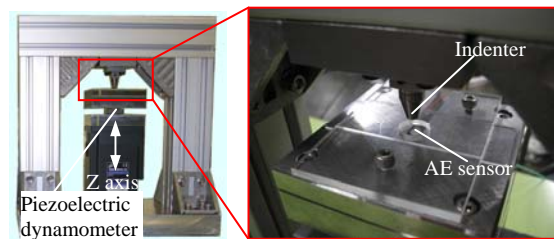


図2 押込み試験機

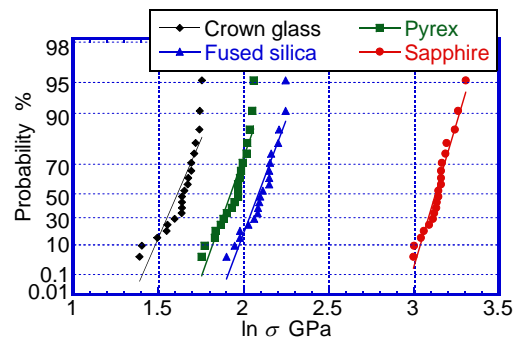


図3 き裂発生時の応力

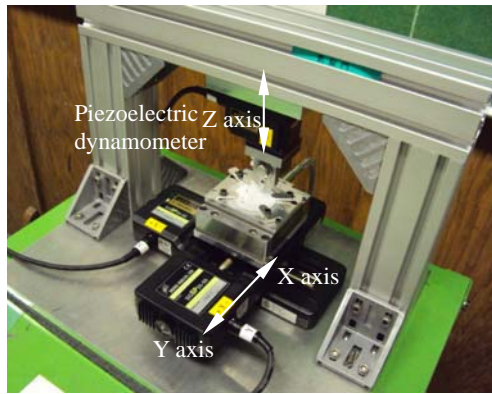


図4 平削り切削試験機

サが取り付けられ、き裂発生時の突発型 AE 信号を検出する。

図3はクラウンガラス、パイレックス、石英、サファイアの r 面のき裂発生時の応力を、平均ランク法によりワイブル確率紙上に示したものである。応力 σ は、動力計で測定したき裂発生時の荷重を F 、圧痕対角線長さを d として、次式で計算したものである。

$$\sigma = \frac{2F \sin(\theta/2)}{d^2} \quad (1)$$

θ は、ピッカース圧子の先端角で 136° である。

図3より、石英の50%確率におけるき裂発生時の応力は 8.1GPa であり、ガラスの中ではクラウンガラスやパイレックスよりも高い。これに対して、サファイアのそれは 22.6GPa 程度であり、さらに高い応力となっている。また、ワイブル分布の傾きは、サファイアが 13.4 で、クラウンガラス(傾き 9.2)、石英(傾き 10.6)、パイレックス(傾き 11.3) より大きい値となっており、バラツキが少ない。

4.2 サファイアの平削り切削

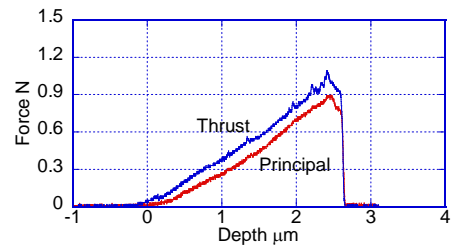
4.2.1 平削り切削試験機

図4に平削り切削試験機を示す。同機は、工具系1軸、被削材系直動2軸の3軸をステップモータで制御している。各軸は、パソコンからドライバを介して送られる運動指令に基づいて位置決めと送り制御される。本機では、工具系の制御による切込みと、被削材側のテーブル移動により、平削り様式で切削する。工具側に取り付けられた水晶圧電型切削動力計によって、工具と被削材との接触を検出し、切削力を測定する。また、CCDカメラによって、工具の接触および切りくず生成が観察できる。

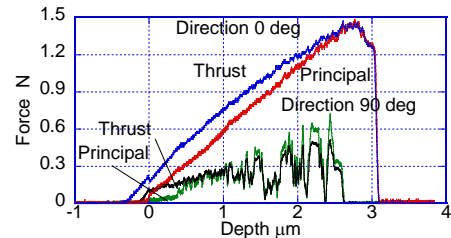
4.2.2 切削特性

(a) r 面の切削特性

図4の試験機上で、先端ノーズ半径 0.06mm の単結晶ダイヤモンド工具を用い、クラウンガラスおよびサファイアの平削り切削試験を行った。切削試験では、切削速度 0.5mm/sec 、切

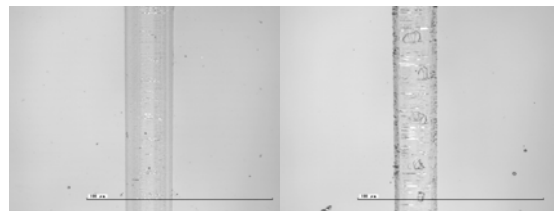


(a) クラウンガラス

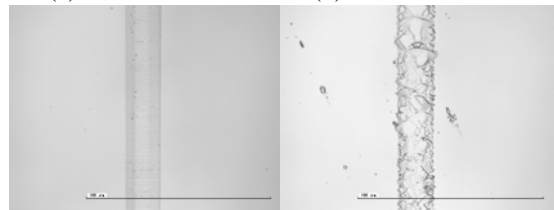


(b) サファイア

図5 切削力



(a) 切削方向 0° (b) 切削方向 90°



(c) 切削方向 180° (d) 切削方向 270°

図6 切削方向による仕上げ面の変化

削距離 5mm 、乾式の条件で、被削材を傾斜させて切込みを連続的に変化させ、切削力および脆性損傷時の切込みを測定した。また、サファイア r 面の切削では、結晶方位による異方性を考慮し、図1の a 軸方向(同図では a_3 軸)を基準に、切削方向を図示のように 45° ずつ変化させた。図5(a)はクラウンガラスの切削力波形であり、同図(b)はサファイアの切削方向 0° と 90° の波形である。クラウンガラスには切削方向による違いは小さかったが、サファイアは切削方向によって切削力および脆性損傷状態が大きく異なる。

図6は各切削方向における深さ $1.2\mu\text{m}$ 付近の加工面である。異方性により、切削方向 90° と 270° において観察される脆性損傷は、 0° と 180° 方向には見られない。図7は脆性損傷のない仕上げ面が得られる最大の切込みを、各切削方向に対して示したものである。切削方向 0° では、切込み $3\mu\text{m}$ 以上でも加工面に脆性損

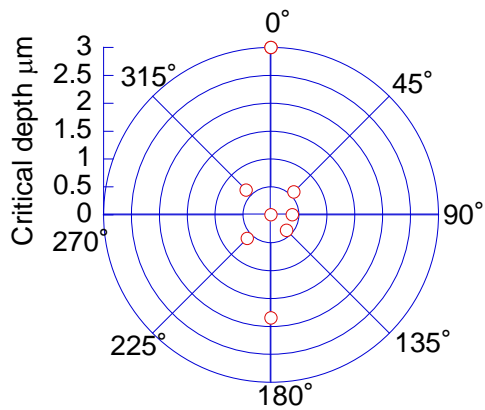
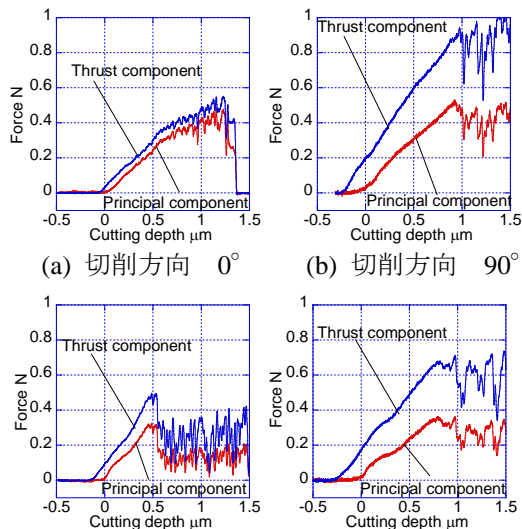


図7 切削方向に対する限界切込み



(a) 切削方向 0° (b) 切削方向 90°
(c) 切削方向 180° (d) 切削方向 270°
図8 切削方向による切削力の変化

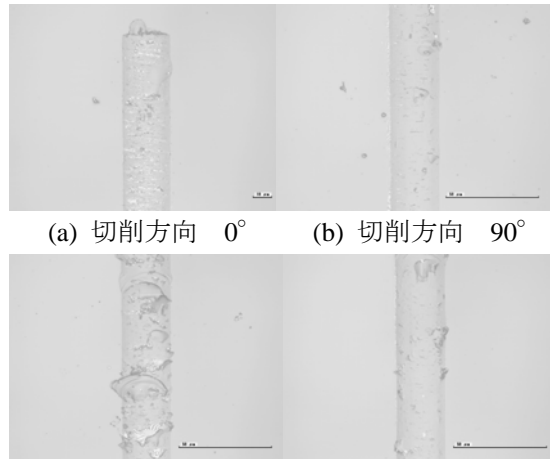
傷が観察されなかったが、切れ刃が欠損したため試験を中止している。以上の結果より、*a* 軸に沿って切削すると大きな切込みでも脆性損傷のない良好な加工面を得られる。

(b) *m* 面の切削特性

m 面の切削試験では、図1の *c* 軸方向を基準に切削方向を時計回りに 30°ずつ変化させた。図8は *c* 軸に対して 0°, 90°, 180°, 270° の切削方向における切削力の変化を示したものである。切削力が線型的に増加する切込みは、切削方向が 0°と 180°に比べて 90°と 270°の方が大きくなる。

図9は、各切削方向の 1.5μm 付近の仕上げ面を示したものである。*c* 軸方向と直交する 90°と 270°の切削方向では、切込みを大きくしても比較的脆性損傷が発生しにくいことがわかる。

図10は、各切削方向に対して5回の試験を行い、それらの限界切込みを示したものである。同図より *c* 軸方向に直交する切削方向では、脆性損傷が生じにくいことがわかる。



(a) 切削方向 0° (b) 切削方向 90°
(c) 切削方向 180° (d) 切削方向 270°
図9 切削方向による仕上げ面の変化

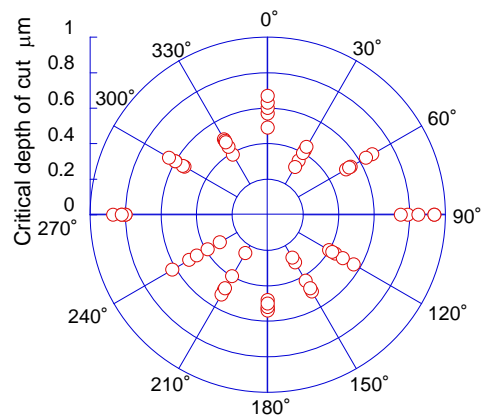


図10 切削方向に対する限界切込み

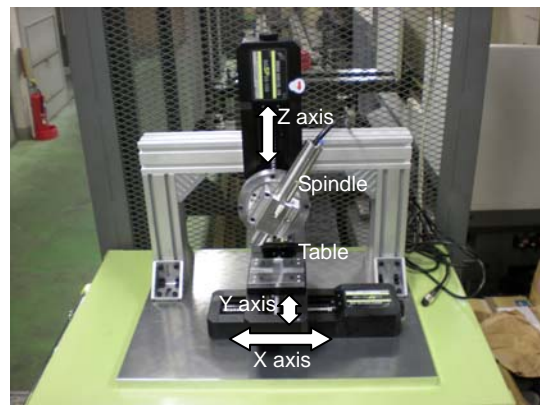


図11 エンドミル切削加工機

4.3 サファイアのエンドミル切削

4.3.1 エンドミル切削加工機

図11に本研究で製作したエンドミル切削加工機を示す。同機は、平削り切削試験機と類似の構成になっており、工具系1軸、被削材系直動2軸の3軸をステッピングモータで制御している。ただし、サファイアのエンドミル切削における特性を測定するために、テーブルには切削動力計が取り付けられるよ

うになっており、切れ刃の接触検出と切削力測定が可能である。各軸の移動量は 100mm、最小分解能は 0.048 μm である。各軸は、パソコンからドライバを介して送られる運動指令に基づいて位置決めと送り制御される。スピンドルは、最高回転数 5000rpm のブラッシュレスモータを用い、シャンク径 4mm までのエンドミルの保持が可能である。スピンドルの振れは 1 μm 以下であり、本試験においては十分な振れ精度を有している。

2 枚刃のボールエンドミルによる切削では、深さ方向に工具半径より小さい切込みを与え、工具を送り方向に傾斜させると、工具一回転中に 2 枚の切れ刃が材料を除去しない空転時間が存在する。この空転時間に工具を十分に冷却することで、工具摩耗が抑制できる。

また、工具を傾斜させることによって切れ刃の粗さが仕上げ面に直接転写されず、切れ刃の凹部で削り残した除去領域を凸部で削るため、一様で良好な加工面が得られる。

以上のような工具姿勢の効果を検討し、切削試験では、図 11 のように工具を送り方向に 45° 傾斜させて切削特性を調べた。

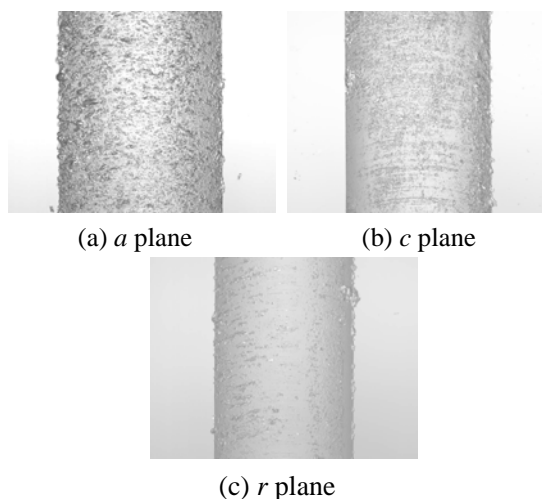
4.3.2 エンドミル切削特性

(1) 各結晶面の仕上げ面

a, *c*, *r* の結晶面に対してエンドミル切削試験を実施し、仕上げ面を比較した。図 12 は、直径 0.4mm の 2 枚刃 cBN ボールエンドミルにより、回転数 20000rpm、深さ方向切込み 0.02mm、送り 0.06mm/min で切削した仕上げ面である。工具は、同図において下から上に送られている。図 13 は仕上げ面を AFM によって観察したものであり、仕上げ面には切りくずの溶着物が観察されている。したがって、サファイアの切削では、脆性損傷とともに溶着性の観点から切削条件を選定する必要がある。また、結晶面によって仕上げ面が異なり、*r* 面の切削における溶着が最も少ないことがわかる。図 14 は水、99°C の温水、切削油を切削液として用い、*r* 面の切削における仕上げ面を比較したものである。なお、温水の加工溝は工具および被削材側のテーブルの熱膨張により、深さ方向の切込みが設定値より大きくなっている。いずれの仕上げ面でも溶着物が確認されるが、切削油を使用した場合の溶着物が少なく、切削油の潤滑効果によって溶着物の抑制ができることがわかる。

(2) *m* 面の切削特性

m 面の結晶面に対して、切削条件が仕上げ面に及ぼす影響を調べた。なお、前項の *r* 面の切削では切削油を使用した場合に溶着物が少なく良好な仕上げ面が得られているが、ここでは、加工後の洗浄工程を考慮し、切削液には水を使用した。



(a) *a* plane (b) *c* plane

(c) *r* plane

図 12 各結晶面の切削仕上げ面

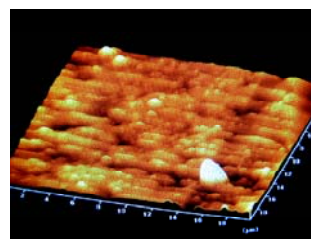
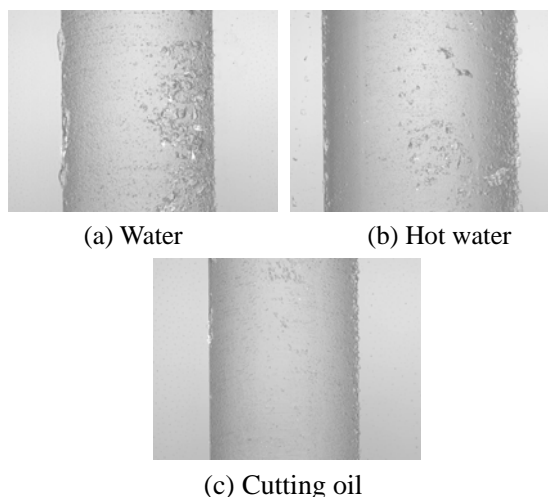


図 13 仕上げ面の溶着物



(a) Water

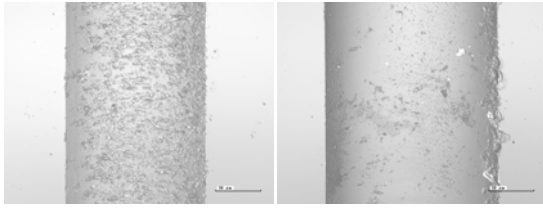
(b) Hot water

(c) Cutting oil

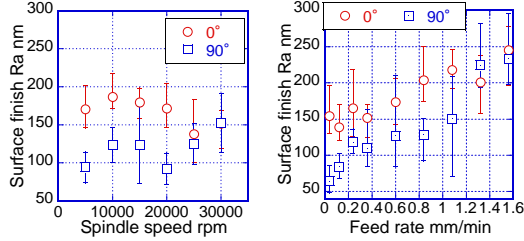
図 14 切削液が溶着性に及ぼす影響

図 15 は回転数 20000rpm において、工具送り方向が仕上げ面に及ぼす影響を比較したものである。同図(a)の *c* 軸に対する工具送り方向が 0° の場合、仕上げ面粗さは Ra 171.5nm であるが、同図(b)の送り方向 90° のそれは Ra 92.4nm である。したがって、エンドミル切削においても異方性の影響が現れており、工具を *c* 軸に対して直交方向に送る場合に良好な加工面が得られる。

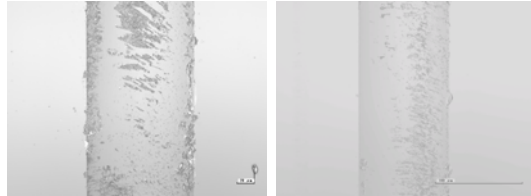
図 16(a)は、深さ方向切込みを 20 μm とし、*c* 軸に対して工具の送り方向が 0° と 90° の場合の各回転数における仕上げ面粗さを比較したものである。ここでは、一切れ刃あたりの送りを 3nm とし、各回転数に対して一分



(a) 切削方向 0° (b) 切削方向 90°
 図 15 切削方向が仕上げ面に及ぼす影響



(a) 回転数の影響 (b) 送り速度の影響
 図 16 切削条件が仕上げ面粗さに及ぼす影響



(a) 切込み $10\mu\text{m}$ (b) 分割切込み

図 17 切込み分割による仕上げ面の改善

間あたりの送りを変更している。同図より、試験回転数においても仕上げ面粗さは、工具を c 軸に対して 90° 方向に送る場合が良いことがわかる。また、回転数に対する特性には、スピンドルも含めた工具系の動特性と振れが影響するが、本試験では 5000rpm と 20000rpm において良好な仕上げ面が得られている。

図 17(b)は、回転数 20000rpm 、深さ方向切込み $10\mu\text{m}$ として、各送り速度の仕上げ面粗さを示したものである。 c 軸に対する工具の送り方向の影響については、前述の結果と同様に 90° の方が 0° よりも良好な仕上げ面となっている。また、送り方向が 90° の条件では、送り速度 0.12mm/min まで $Ra\ 100\text{nm}$ 以下の良好な仕上げ面が得られている。

(3) エンドミル切削における工程分割

サファイアの切削においては、脆性損傷とともに切りくず等の材料の再溶着が表面粗さを劣化させる原因となる。そこで、切削熱を抑えるために、切込みを分割して、溝加工を試みた。図 17 は、一度に $10\mu\text{m}$ の切込みで溝加工した場合と、 $10\mu\text{m}$ の切込みを $4\mu\text{m}$ と 2 回の $3\mu\text{m}$ の切込みに工程分割して切削した仕上げ面である。切込みを分割することにより、溶着が抑えられ、仕上げ面粗さの改善が見られる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Matsumura, T.: Modeling of Cutting Process with Cutter Axis Inclination, Advanced Materials Research, Vol. 223, pp. 66-74, 2011.

doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.223.66

〔学会発表〕(計 1 件)

松村 隆, 遠藤勇起: サファイアの微細切削, 第 8 回日本機械学会生産加工・工作機械部門講演会論文集, pp. 227-228, 2010年 11月 19日.

〔その他〕

松村 隆: サファイアの高効率切削技術, テクニカルショー横浜産学連携ワークショップ, 2011年 2月 4日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松村 隆 (MATSUMURA TAKASHI)

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号: 20199855

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし