

平成 21 年 5 月 27 日現在

研究種目：基盤研究（C）
研究期間：2007～2008
課題番号：19560108
研究課題名（和文） 切削における摩耗を利用したサファイアの三次元加工
研究課題名（英文） Three Dimensional Machining of Sapphire by Tool Wear during Cutting Process
研究代表者
氏名（ローマ字）：中本 剛（NAKAMOTO TAKESHI）
所属機関・部局・職：千葉大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：30198262

研究成果の概要：サファイアは工業上、有用な材料であるが、硬度が高いため、その加工は困難である。本研究では、ガラスをサファイアで切削したときの摩耗を逆に利用して、サファイアを加工することを目的とした。この加工を実現するための小型加工機を製作し、これを用いて実際に加工実験を行った。加工されたサファイアの輪郭は明瞭であり、その仕上げ面の算術平均粗さは、最高で、 $0.01\mu\text{m}$ であった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2008 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

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，切削加工，ガラス，摩耗

1. 研究開始当初の背景

サファイアは非常に高硬度であるため、これを加工するためには、切断工程においても研磨工程においてもダイヤモンドなどを使用することが多い。しかし、加工の際にダイヤモンドカッターや砥粒は著しく摩耗量してしまう。さらに、切断加工や研磨加工ではサファイアを三次元形状に加工することは困難である。機械的な加工方法ではなく、サファイアをレーザーによって加工する研究は行われている。しかし、熱的な加工であるため、加工後の表面は熱影響層が生じる恐れがある。さらにレーザー加工では、切断や溝付け加工を施すことは容易に行うことができるが、三次元形状に加工を施すことは困難である。

2. 研究の目的

サファイアは大気中では熔融温度に達しても酸化されない安定した物質であるが、 SiO_2 とは 800°C 以上の高温において反応し、複酸化物を生成することが報告されている。この反応を利用して、サファイアを研磨した報告はある。しかし、研磨加工ではサファイアを、三次元形状に加工することは困難である。

ところで切削加工においては、その加工点では高温、高圧状態になっていることはよく知られている。本研究では、 SiO_2 を主成分として含むガラスをサファイアで切削することによって、加工点で反応を生じさせて、逆にサファイアに対して加工を施すことを目的としている。

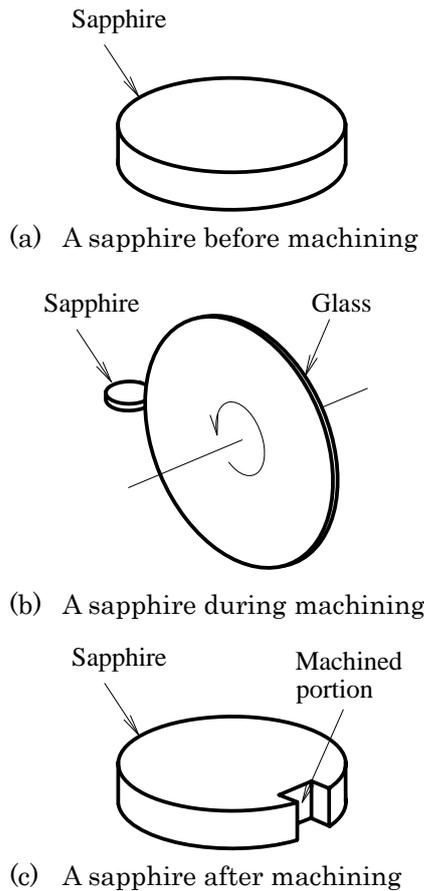


Fig. 1 Schematic diagram of machining method

3. 研究の方法

図1にサファイアでガラスを切削している状態の概略を示す。サファイアは、はじめは図1(a)のような円板形状をしているとする。このサファイアで図1(b)のように円板形状のガラスの側面を切削する。この加工により、サファイアが摩耗して、図1(c)の形状になる。

本研究では、(株)アイ・アール・システム製の多結晶サファイアを使用した。このサファイアは直径 8.5 mm、厚さ 1.5 mm の円板形状である。本実験では、サファイアの相手材料としてソーダ石灰ガラスを選定した。その形状は、直径 45 mm、厚さ 1.73 mm の円板であり、SiO₂ が 70%以上、含まれている。

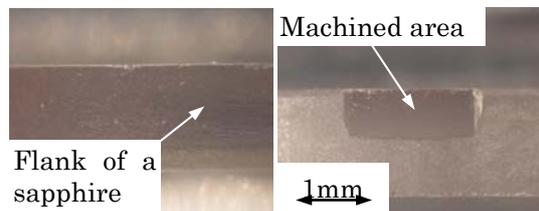
本研究では、図1に示したように、ガラス円板の外周をサファイアで切削する。この方式で加工する装置を製作した。その写真を図2に示す。主軸は高トルクで高回転数が得られるようにACサーボモーターを使用した。このACサーボモーターの定格トルクは 1.3 Nm で、最高回転数は 4,500 rpm である。ACサーボモーターに直結した主軸にガラス円板を取り付けた。サファイアは工具ホルダー



Fig. 2 Photograph of experimental apparatus

Table 1 Machining conditions

Machining speed V (m/min)	250, 500
Feed rate f ($\mu\text{m/s}$)	1–3
Machining time T (min)	5–25
Rake angle (degree)	–10
Relief angle (degree)	10



(a) Before machining (b) After machining
Fig. 3 Optical micrograph of flank of a sapphire

に取り付け、工具ホルダーを XY ステージに設置した。XY ステージは送りねじ式で、パルスモーターで駆動している。このステージを移動させることによって、ガラス円板の外周を切削した。XY ステージの最小送り速度は 1 $\mu\text{m/s}$ である。加工条件を表1に示す。

4. 研究成果

(1)加工の進展

図3(a)に側面から見た加工前のサファイアの写真を示す。このサファイアに10分間、加工すると図3(b)のようにサファイアが除去される。図3(b)の写真から、サファイアが明瞭な輪郭で加工されていることがわかる。加工後のサファイアの概略を図4に示す。図4の加工長さ、加工幅、加工深さを光学顕微鏡で測定した。

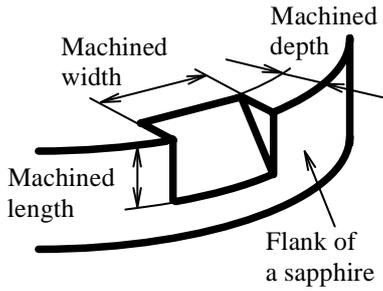


Fig. 4 Schematic diagram of machined portion on a sapphire

図 5 (a) に加工時間と加工長さの関係を、図 5 (b) に加工幅、図 5 (c) に加工深さを示す。図 5 (b) 中の実線はガラス円板の幅の値である。加工時間とともに加工長さや加工深さは増加するが、その増加割合はしだいに減少する。加工幅はほぼ一定で、ガラス円板と同じ程度である。

(2)除去体積

サファイアが除去された部分を三角柱で近似して除去体積を計算した。これを図 6 に示す。除去体積はほぼ加工時間に比例する。ここで、除去比 R を式(1)で定義する。

$$R = \frac{V_s}{V_g} \quad (1)$$

式(1)において、 V_s はサファイアの除去体積で、 V_g は切屑となったガラスの除去体積である。除去比 R の値が大きいほど、加工の除去効率が高いことになる。

図 7 に加工時間と除去比を示す。図 7 より、加工が進展するにつれて、除去比は低下する。これは、加工が進むにつれてサファイアが除去されて、サファイアとガラスの接触面積が増加し、面圧が低下するためであると考えられる。

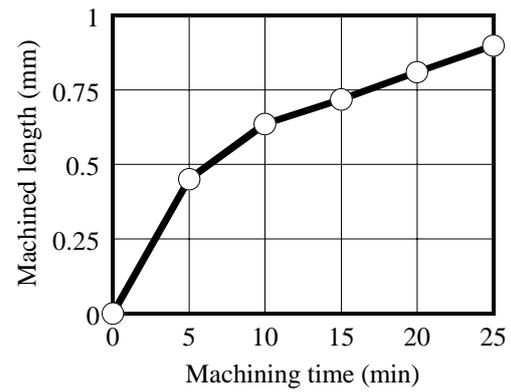
(3)切削速度と送り量

図 8 に切削速度と除去体積を示す。ガラス円板が 1 回転する間のサファイアの送り量が等しくなるようにして実験を行った。図 8 より、除去体積は、切削速度に比例する。

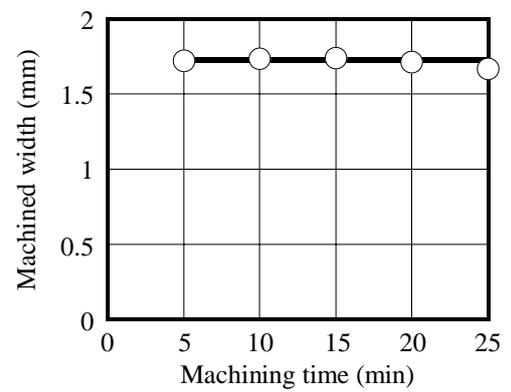
図 9 に送り量と除去体積、除去比を示す。除去体積は送り量に比例する。送り量が大きくなると、切屑として無駄に排出されるガラスの体積が増加するために、除去比の値が減少すると考えられる。

(4)加工面の粗さ

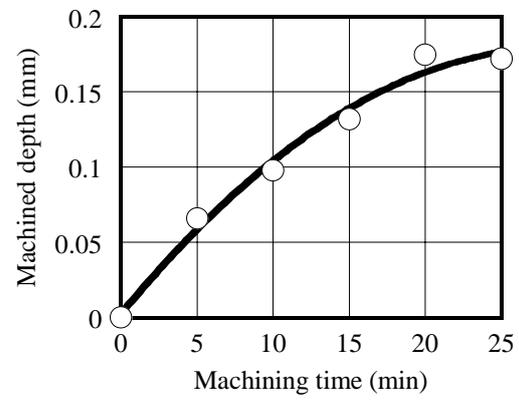
サファイアの加工面を触針式粗さ計で測定した。図 10 (a) にサファイア加工面の断面曲線を示す。図の円弧の上側がサファイアの



(a) Machined length



(b) Machined width



(c) Machined depth

Fig. 5 Progress of machining
[$V=500$ m/min, $f=1\mu\text{m/s}$]

円板面であり、円弧形状のまま除去されている。円形のサファイアがガラスを切削するので、ガラスの断面は、サファイアの円弧を転写した形状になる。このガラスでサファイアを加工するので、サファイアも円弧形状を保ったまま加工されることになる。

サファイアの加工面の粗さ曲線を図 10 (b)

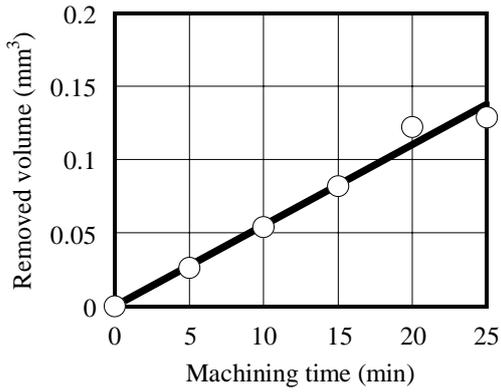


Fig. 6 Removed volume
[$V=500$ m/min, $f=1\mu\text{m/s}$]

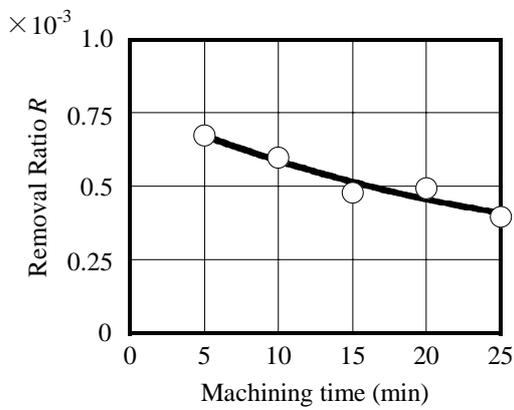


Fig. 7 Removal ratio and machining time
[$V=500$ m/min, $f=1\mu\text{m/s}$]

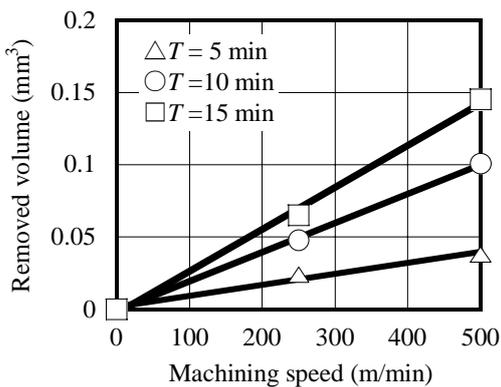


Fig. 8 Relationship between removed volume and machining speed
[$f=1\mu\text{m/s}$ ($V=250$ m/min)
 $f=2\mu\text{m/s}$ ($V=500$ m/min)]

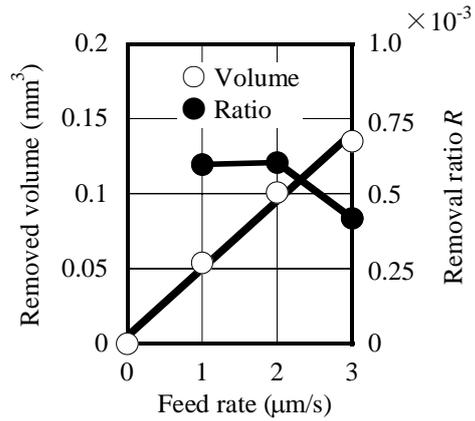
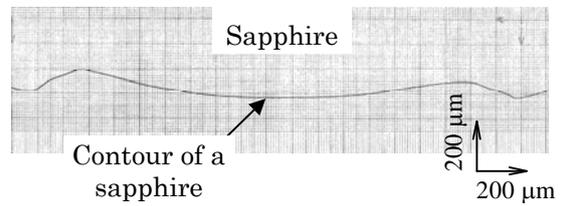
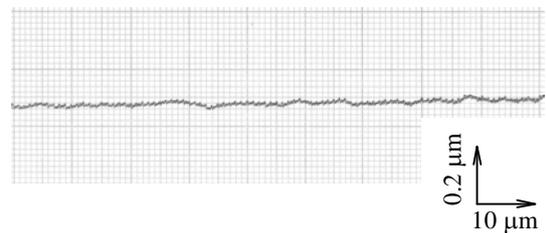


Fig. 9 Feed rate, removed volume and removal ratio
[$V=500$ m/min, $T=10$ min]



(a) Cross sectional profile



(b) Roughness

Fig. 10 Cross sectional profile and roughness profile of a machined sapphire
[$V=500$ m/min, $f=3\mu\text{m/s}$, $T=10$ min]

に示す. 加工面の算術平均粗さは, 最小で $0.01\mu\text{m}$ の値が得られた.

(5) 考察

図 6, 図 8, 図 9 より, サファイアの除去量が加工時間, 切削速度, 切込み量に比例する. これは, 加工量を制御するうえでは都合が良いことになる. 本方法は, 切削によって生じる高温, 高圧を利用してサファイアと SiO_2 を反応させ, これを加工に利用することを目的としている. 切削加工においては, 切

削速度を増加させると切削温度は上昇し、切削温度が上昇すると反応は顕著になる。このため、切削速度が増加すると、サファイアの除去量は著しく増加するはずである。本加工では、排出されたガラス、すなわち、通常の切削加工で切屑に相当する形状は棒状であった。サファイアがガラスを切削するときに、ガラスを脆性破壊していることになり、連続型の切屑が排出される場合に比べると、サファイアとガラス切屑の接触は少ないと考えられる。もし、延性モードの切削を行うことができれば、サファイアの除去量をさらに大きくすることができる可能性があると考えられる。

本加工方法において生じた反応を調べるためには、除去されたガラスの成分分析を行う必要がある。SiO₂砥粒を用いたときの加工後の成分分析は他の研究で行われている。それによると、摩耗粉のX線回折では、反応生成物のピークは見られず、この摩耗粉を1273Kで熱処理することによって、ムライト(3Al₂O₃・2SiO₂)などを生成したと述べている。すなわち、反応生成物は非晶質として脱落したと推定されている。本研究においても、加工のメカニズムは同様であると推測される。

通常、サファイアは、結晶方位面による異方性が大きい。本加工法は、材料の硬度差を利用した加工法ではないため、結晶面方位にかかわらず、サファイアを加工することが期待できる。結晶面方位とサファイアの除去量については、現在、検討している。

本加工法では、サファイアがガラスを切削するときにサファイアの形状がガラスに転写され、その形状をサファイアが切削して、サファイアが摩耗することによって加工される。本実験では、サファイア、ガラスともに円弧形状を保ったまま、加工が進行する。このため、ガラスの初期断面形状は、そのままサファイアには転写されない。サファイアをさまざまな形状に加工するためには、本実験のように厚いガラス円板で加工するのではなく、サファイアの特定の箇所のみを薄いガラス円板によって逐次、加工するほうが良いことになる。しかし、薄いガラス円板では加工中に破碎してしまう恐れが生じる。サファイアをさまざまな形状に加工することについても別途、検討したいと考えている。

(6)まとめ

本研究で得られた結論を以下に記す。

- ① ガラス円板をサファイアで切削することにより、逆にサファイアを加工する装置を製作した。
- ② 本装置を使用してサファイアを加工することができた。サファイアの除去体積は、加工時間、切削速度、切込み量に比

例する。

- ③ サファイアの仕上げ面の算術平均粗さRaは最高で0.01μmである。

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1件)

- ① 中本剛、須崎徹、ガラスを切削したときの摩耗を利用したサファイアの加工、日本機械学会論文集(C編)、第75巻、第752号、pp.1122~1127(2009年)、査読あり。

〔学会発表〕(計3件)

- ① 中本剛、萩田陽司、ガラスを切削したときの摩耗を利用したサファイアの加工(結晶面方位と除去量)、2009年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集、pp.527~528、2009年3月13日、中央大学後楽園キャンパス(東京都)、査読なし。
- ② 中本剛、佐草利典、鉄系材料切削による摩耗を利用したダイヤモンドの加工(加工面形状修正のインプロセス化)、2008年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集、pp.769~770、2008年9月17日、東北大学川内北キャンパス(宮城県仙台市)、査読なし。
- ③ 須崎徹、中本剛、ガラスを切削した時の摩耗を利用したサファイアの加工、2007年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集、pp.493~494、2007年9月13日、旭川市ときわ市民ホール(北海道旭川市)、査読なし。

6. 研究組織

(1)研究代表者

中本 剛 (NAKAMOTO TAKESHI)

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30198262

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし