延性モード研削加工の除去機構を模した 背分力方向振動切削の試み*

—合成石英ガラスにおける延性モード面増大効果—

小山内 裕太** 今井 健一郎***

Thrust Force Directional Vibration-Assisted Cutting Based on a Removal Process of Ductile-Mode Grinding
- An Effect of Increased Ductile-Mode Surface for Cutting of Synthetic Silica Glass -

Yuta OSANAI and Kenichiro IMAI

Our research introduced a 40kHz thrust force directional vibration-assisted ductile-mode grinding of hard and brittle materials. And, the vibration-assisted grinding was adopted in order to avoid brittle fracture on the ground surface. But, the cause of this result could not be proved, because it was difficult to investigate removal process by many and various abrasive grains. Therefore, this study describes an evaluation of ductile-brittle transition with thrust force directional vibration-assisted cutting. Because the movement of cutting tool edge is similar to that of a grain on grinding wheel with the vibration. Then, cutting tool is oscillated by Fast Tool Servo actuator, and the frequency 1.00 kHz and amplitude 1.33 μm . In this cutting process, some intermittent cutting marks occur in the sub-micron depth. The rake angle of diamond tool is -35 and -65 degrees. Workpiece is synthetic silica glass. As an experimental result, the vibration-assisted cutting of the silica glass has a larger ductile-mode surface at removal depth of cut 0.09-0.15 μm . And, it guessed that this increase of ductile-mode surface is affected by plastic flow of the workpiece under the tool, and ease of cut into workpiece by movement of cutting tool.

Key words : vibration-assisted cutting, synthetic silica glass, diamond tool, removal process, ductile-mode grinding

1. 緒 言

光学ガラスやファインセラミックスに代表される硬脆材料は、その機械的特性や耐熱性に起因して脆性破壊が生じ易い。そのため、研磨加工を仕上げ加工として行うことが多い。しかし、研磨加工は時間がかかるため、加工能率の向上を図るため延性モード研削加工が行われている。本研究ではさらなる加工能率と加工面品位の向上を目指し、研削加工に超音波振動を援用した研削加工を試みている。これまでに、切込み方向に超音波振動を援用した研削加工において光学ガラス BK7 の加工を行い、振動を援用しない研削加工と比較し、3 倍の切込みでも延性モード面が得られている¹⁾。しかし、研削加工では無数の砥粒で加工を行う為、砥粒 1 つの除去状態を把握することが困難であり、延性モード面を増大させた要因は明らかにできていない。

そこで本研究では、切込み方向振動援用研削加工による延性モード面増大の要因を明らかにするため、工具に背分力方向の振動を援用した切削加工（以下 背分力方向振動切削）を行う。この場合、背分力方向の振動により工具切れ刃の軌道は正弦波形を描く（図 1）。この除去過程 1 つ（太線部）に注目すると、切込み方向振動援用時の研削加工における砥粒の軌道とほぼ同等であると言える。つまり、背分力方向振動切削は上述の振動援用研削加工における砥粒の除去状態を模擬できると考えられる。この実験で得られた結果から、切込み方向振動援用研削加工による延性モード面増大の要因を明らかにできると考えた。

硬脆材料の背分力方向振動切削加工における除去状態を把

Fig. 1 Movement of thrust force directional vibration-assisted cutting

握するため、硬脆材料の中でも結晶方位を持たず、金属不純物をほとんど含まない合成石英ガラスを被削材とする。背分力方向に援用する振動については、超音波振動では振動数が高く、切削の状態を把握することが難しい。そのため Fast Tool Servo（以下、FTS）という高速工具サーボ機構を使用し、分析可能な 1kHz の振動を工具に援用する。FTS については次項で詳述する。

本稿の目的は、1) 振動援用の有無で得られた結果を比較し、背分力方向振動切削で延性モード面が増大するか確認すること、2) 除去プロセスを検討して加工中の延性—脆性遷移を示し、振動援用時に延性モード面が増大する原因を考察することである。

2. 実験装置および実験方法

自作した実験装置の概要図を図 2 に示す。被削材は試料台に接着剤で貼り付け、その試料台を動力計（Kistler 社、type9273）に取り付けることで、加工中の主分力と背分力を測定した。また、試料台と動力計間の一端にシムテープを挟み、被削材を工具の送り方向に対して 0.25 $\mu\text{m}/\text{mm}$ 傾けた。これにより、切削が進行するにつれて切込み深さが増大し、切込み深さと延性—脆性遷移の関係を調べられる。動力計はイケール付きの土台ごと直動ガイド 2 本で支えるステージに取り付けた。背分力方向の振動を援用するため、切削工具を上述の FTS に取り付けた。FTS の主な仕様を表 1 に示す。この FTS は、1.6kHz 以下の振動を高精度に

* 原稿受付 令和 2 年 5 月 10 日

掲載決定 令和 2 年 8 月 20 日

** 正 会 員 神奈川工科大学大学院（現、油研工業（株）；神奈川県綾瀬市上土棚 4-4-34）

*** 正 会 員 神奈川工科大学（神奈川県厚木市下荻野 1030）

Fig. 2 Schematic drawing of experimental equipment

Table 1 Specifications of Fast Tool Servo

Model	NANOWAVE FTS5
Drive system	Piezo actuator
Maximum displacement	10 μm
Response bandwidth	1.6 kHz
Displacement control resolution	2 nm
Thrust stiffness	45 N/ μm

Table 2 Experimental condition

Workpiece	Synthetic silica glass 4×20×1mm
Cutting tool	Single crystal diamond tool Nose radius=0.8 mm Made by A.L.M.T. Corp.
Tool condition ①	Rake angle= -35°, Clearance angle= 46°
Tool condition ②	Rake angle= -65°, Clearance angle= 46°
Slide velocity	400 mm/s
Cutting fluid	Ethanol
Vibration conditions	Amplitude 1.33 μm
	Frequency 1.00 kHz
	Wavelength 400 μm

制御でき、スラスト方向に高い剛性を有している。これにより、加工中に正確な周波数と振幅を維持できる。実験では 1kHz の振動を切削工具に援用して、切削痕一つ一つの分析を可能とした。なお、FTS は直動ガイドのステージに取り付けた。切込み深さの調節および工具の送りには電動アクチュエータを使用した。

切削痕の観察には光学顕微鏡を使用した。切削痕の表面層に微小クラックが生じている可能性はあるが、測定が難しく評価は困難である。そのため、今回は切削痕表面の観察結果から、延性モード面の生じ方などを調査した。なお、光学顕微鏡を用いて観察した切削痕の画像は、見易くする為に明るさ-10%、コントラスト+55% の補正を行った。また、切削痕の形状測定には表面粗さ計(東京精密 SURFCOM 130A)を使用した。これは触針式の表面粗さ計であり、先端半径 2 μm の触針で測定した。

実験条件を表 2 に示す。工具には単結晶ダイヤモンド R パイトを用いた。本実験では再研磨直後の鋭利な状態の工具切れ刃と、摩耗した工具切れ刃を用いて比較検討を行った。再研磨後と、合成石英ガラスの切削実験で 6 回使用して摩耗した切れ刃の微分干渉顕微鏡による画像を図 3 に示す。同図(b)より、逃げ面の刃先において工具摩耗が確認できる。なお、図に矢印で示した部分は白くなっているが、再度実験で使用したところ、確認出来なくなったため、切削に伴って生じた付着物であると考えられる。両者を比較した理由は、研削加工における砥粒切れ刃は様々な形状を有しており、微小で砥粒一つあたりの切込み深さも浅いため、結果として切れ刃稜の半径も多様であると推察されるからである。工具すくい角については、砥粒全般が大きな負のすくい角と考えら

Fig. 3 Tool wear condition

Fig. 4 Calculation of removal rate

れることから、-35° と -65° に設定した。なお、背分力方向振動切削では工具が正弦波の軌跡を描くため、被削材からみた実質のすくい角が変化する。今回の条件では $\pm 1.2^\circ$ の変化となる。

3. 切削痕の評価方法

硬脆材料の切削加工では被削材が除去されず、工具下方に流動することがある²⁾。この非除去部の流動量を評価するため、除去率を定義して評価に用いた。除去率は図 4(a) に示す様に、(除去断面積)/(すくい面接触前面投影面積)と定義した。除去率が低いときは被削材に工具形状が転写されず、被削材が工具側方や下方に流動したことを表わす。除去断面積は、表面粗さ計で測定した断面形状のデータを使用し、切削痕の端から端までのデータ間を台形近似して積分することで算出した(図 4(b))。なお、図中に示した測定点の間隔 1 は 0.3 μm である。すくい面の接触前面投影面積は、まず切削痕の幅と工具コーナ半径を用いて、すくい面-被削材間の接触面積を算出する(図 4(c))。その後すくい角を用いて前面投影面積へと補正した。

前述の通り、これらのパラメータは被削材の工具下方や側方への流動状況を把握するために用いる。つまり、被削材が連続的に流動せず、破壊が生じる脆性モード面に適用することは不適切である。したがって、安定した延性モード面が得られ易いと考えら

Fig. 5 Ductile-brittle transition of conventional cutting

れるすくい角-65°の結果で使用し、脆性モード面が生じた部分では評価しない。

4. 実験結果

4.1 すくい角-35°の場合(条件①)の切削痕

まず、切込み方向振動援用研削加工と同様に、背分力方向振動切削でも延性モード面が増大するか確認する。表 2 の条件①で再研磨した工具を使用して、合成石英ガラスに慣用切削(実験 1)を行い、得られた切削痕(切削痕 A とする)とその除去深さを図 5 に示す。なお、切削方向における除去深さの変化は、切削痕の幅方向断面形状における最深部の値を用いて示した。例として、除去深さ(切削方向)の図 5(b) と、切削距離 1150μm (写真中の点線付近)の断面形状を図 5(c) に示している。写真で淡く見える部分が延性モード面、濃い部分が脆性モード面である。図 5 の(a), (b) より、除去深さが 0.09~0.15μm において多数の脆性破壊面が発生していることが分かる。

次に、背分力方向振動切削(実験 2)を行い、得られた切削痕 B~E と、その除去深さを図 6 に示す。除去深さと脆性モード面の関係について見てみると、切削痕 B の除去深さは 0.12μm 程度であるが、脆性モード面は確認できない。切削痕 C では除去深さ 0.2μm 程度でも慣用切削と比較して延性モード面が多いように見える。さらに、背分力方向振動切削では延性モード面の生じ方にある傾向が見られる。具体的には、切削痕 1 個の切削過程において、切込み深さが減少していく工具離脱部(切削痕右半分)では、切込み深さが増加していく工具進入部(切削痕左半分)よりも延性モード面が多い(切削痕 D と E)ことがわかった。

脆性モード面の発生状態を比較する為、フリーの画像処理ソフト GIMP を使用して明度分布で評価した。評価手順は、まず延性モード面のみにおける明度分布を測定する。その後、脆性モード面を含む測定領域全体の明度分布を測定し、その分布における延性モード面の明度分布領域の割合を算出することで、測

Fig. 6 Result with polished cutting tool at condition about tool ①

Table 3 Percentage of ductile-mode surface at 2 types of cutting

Cutting mark	Measured area (Removal depth of cut)	Percentage of ductile-mode surface
A (Conventional cutting)	0.09~0.12μm	84.6 %
A (Conventional cutting)	0.12~0.15μm	78.1 %
B	More than 0.09 μm	99.2 %
C	More than 0.15 μm	95.4 %
D	Left half	85.4 %
D	Right half	96.7 %
E	Left half	76.0 %
E	Right half	87.2 %

定領域全体における延性モード面の割合を推定した。測定領域として、図 5 の慣用切削によって得られた切削痕 A は、除去深さ 0.09μm~0.12μm と 0.12~0.15μm に分け、図 6 の切削痕 B は除去深さ 0.09μm 以上、同 C は 0.15μm 以上とした。また、切削痕 D および E は、それぞれ切削痕の工具進入部(切削痕左半分)と工具離脱部(右半分)に分けて測定した。得られた結果を表 3 に示す。同表より、背分力方向振動切削では、慣用切削に比べて延性モード面が増大し、特に工具離脱部で広い延性モード面が得られたことが分かる。

4.2 すくい角-35°における脆性モード面の評価

前項で、背分力方向振動切削を行うことで延性モード面が増大すること、また、延性モード面が得られる箇所に偏りが生じることを明らかにした。しかし、その理由については示していない。延性モード面の増大は脆性モード面の減少を意味する。そこで、本項では脆性モード面の発生状態を把握する。ところで、負のすくい角工具を用いた単結晶 Si の切削加工では、横クラックとへき開破壊(クラック)が生じる²⁾。ここで、横クラックは、工具下方に流動した被削材の深い位置における一部が、完全な静水圧状態で圧縮されることで生じる。完全な静水圧が負荷されると弾性変形を

Fig. 7 Removal status of cutting at negative rake angle

生じるが、工具と接している被削材表面部では塑性変形が生じるため、工具通過後に各変形の残留応力により、塑性変形と弾性変形の境界でクラックが生じる。この境界で発生するクラックが横クラックである(図7)。なお、本研究ではRパイトを使用しているため、圧縮時に被削材の逃げ場が無い工具先端部ほど横クラックが生じやすいと考えられる。一方で、へき開破壊は刃先の引張応力が要因となって最大主応力に垂直な方向へ生じるクラックであり³⁾、引張応力に起因するため、圧縮応力により発生が抑制される。これらの破壊が合成石英ガラスの切削加工でどのように生じ、また、背分力方向の振動を援用することで減少するか確認する。

脆性モード面を発生させるため、切削実験で複数回使用し、刃先が摩耗した工具を用いて実験を行った。これにより、脆性モード面の確認と同時に、工具切れ刃稜半径が比較的大きい場合の除去状態を確認できる。実験は慣用切削(実験3)と背分力方向振動切削(実験4)の両方で行い、振動援用の有無による影響も調査した。

まず、実験3で得られた切削痕を図8(a)に示す。同図より、無数の脆性モード面が生じていることが分かる。切込み深さ(切削痕幅)の変化に着目すると、(a)に破線で示した付近から急激に切込み深さが増している。この破線前後の切削痕を拡大した図8(b)を見ると、脆性モード面の発生状態が異なっている。この異なる状態を表した模式図を図8(c)に示す。切込み深さの浅い左図では、切削痕全体に脆性モード面が発生しているのに対し、切込み深さの深い右図では、四角で示した切削痕中央部に多く発生している。左図の脆性モード面は、図8(a)の切削痕幅の変化から分かる通り、切込み深さが増加できておらず、工具により被削材が圧縮されている状況であることから、横クラックであると考えられる。横クラックは、工具直下の塑性変形および弾性変形の境界で生じるために深さが安定すると推察される。図8(b)のそれぞれの破線付近における断面形状を図8(d)に示す。図8(d)の左図では脆性モード面にも関わらず深さが安定しており、前述の特徴と一致する。そして、実験1(図5)では横クラックはほとんど確認できないことから、刃先稜半径の増大に起因して生じたと考えられる。一方で、図8(b)右図で生じた脆性モード面は、切込み深さが深い状況であることから、引張応力に起因したクラックであると考えられる。なお、幅方向の大きさがクラック発生部で最大となり、その後縮小するという過程を繰り返しているのは、次の様に説明できる。クラック発生部は被削材からの反力が減少するために刃先が切り込むが、それ以外の延性モード面部で工具は支持されている。これにより、工具の移動とともに刃先が押し戻され、脆性モード面が縮小したのである。以上の結果より、合成石英ガラスの切削加工では横クラックとクラックが生じること、刃先稜半径が増大することによって横クラックが生じ易くなることが分かった。

次に実験4(背分力方向振動切削)で得られた切削痕を図9に示す。同図(a)より、切込み深さの浅い切削痕では、背分力方向振動切削でも横クラックは発生した。ただし、図9(a)と(b)の

(a) Transition from brittle-mode to another brittle-mode

(b) 2 types of brittle-mode surface

(c) Pattern diagram of each brittle-mode surface

(d) Cross-sectional profile on dotted line

Fig. 8 Brittle-mode surface of conventional cutting using used tool

(a) Smaller cutting marks

(b) Larger cutting marks

Fig. 9 Brittle-mode surface of vibration-assisted cutting with used tool

丸で囲んだ範囲では、切込み深さの比較的小さい工具進入部で、わずかに延性モード面が得られており、慣用切削(図8)と異なる。切込み深さの深い切削痕では、図9(b)中に四角で示した切込みが浅くなる工具離脱部において広い延性モード面が得られている。以上の結果から、背分力方向振動切削の工具進入部と工具離脱部、特に後者において、横クラックの発生を抑制する効果があると考えられる。ここで再研磨後の工具による結果の図6を見ると、脆性モード面が切削痕幅方向中央付近に発生している。したがって、図6において生じた脆性モード面はクラックであると考えられる。この場合も、工具離脱部ではクラックの発生が抑制されている(図6(b))。つまり背分力方向振動切削による延性モード面の増大効果は、工具進入時に横クラック、工具離脱時に横クラックとクラックが抑制されたことによるものと考えられる。

Fig. 10 Result of conventional cutting at condition about tool ②

4.3 すくい角-65° の場合(条件②)

すくい角-35° の背分力方向振動切削では、前項に示したように一つの切削痕内でクラックや横クラックの発生に偏りが生じていた。これらの脆性破壊は、被削材の非除去流動量による影響を受ける(図 7)。したがって、背分力方向振動に伴う工具軌道の変化によって、被削材の流動状態が変化すると考えられる。そこで3節で述べた除去率を用いて、被削材の非除去部の流動状態を把握する。しかし、すくい角-35° ではクラックが生じやすく、評価が難しい。また、工具の背分力方向の動きによって被削材の流動状態が変化するのであれば、大きな切削痕の方が振動速度の変化量も大きく、影響を評価し易い。そこで、再研磨した工具を使用し、すくい角を-65° にすることで、すくい面近傍での圧縮力を増大させてクラックの発生を抑制できると考えた。しかし、閤氏らの報告によれば、すくい角が-60° より負に大きくなると、横クラックが発生し、臨界切込み深さが減少すると報告されている²⁾。ただし、このとき使用している工具は逃げ角 6° の平バイトである。一方で、本研究では逃げ角 46° のRバイトを使用している為、被削材が工具側方に流動し易いことに加え、逃げ角も大きいことで圧縮力が緩和される。これにより、すくい角を負に大きくしても延性モード面が得られると考えた。ここで、慣用切削を実験 5、背分力方向振動切削を実験 6 とする。

まず、実験 5 において得られた切削痕の画像と、その破線付近(幅方向)の断面形状、そして全体の除去率および切削抵抗を図 10 に示す。すくい角-35° では除去深さ 0.09 μm 程度で脆性モード面が生じていたが、すくい角-65° では、(a) 右図の様に除去

Fig. 11 Result of vibration-assisted cutting at condition about tool ②

深さ 0.25 μm でも広い延性モード面が得られた。ただし、(a) 左図に示す様に、除去深さ 0.07 μm で脆性破壊が生じた。この為、すくい角を-65° にすることで、臨界切込み深さが増加するかについては明らかにできなかった。これは、被削材の下方流動量が多くなることで、被削材表面の微小な傷によって脆性モード面が生じ易くなるためだと推察される。実際に除去率は 25% 前後であることから、被削材の大部分が工具下方および側方に流動していることが分かる。この結果に起因して、切削抵抗も背分力 F_t が主分力 F_c の 3 倍程度になったと考えられる。なお、切削前から振幅 0.4 N 程度で振動している主分力の変動は、工具を送るアクチュエータの動きによる影響である。

次に、実験 6(背分力方向振動切削)で得られた切削痕の画像と、その除去率、切削抵抗を図 11 に示す。同(a)左図は切削開始から 7 個目、右図は 10 個目の切削痕を示している。ここでは、ほぼ全面にわたって延性モード面が得られた。この時の除去率は、それぞれの切削痕中で、約 35% から 5% 程度へと変化している(図 11(b))。10 個目の切削開始付近で除去率が 30% 程度になっていることから、工具摩耗による影響ではないことが分かる。したがって、背分力方向振動切削では、切削痕 1 つの中で、除去率が大きく変化することが明らかになった。この除去状態の変化は切削抵抗でも確認でき、各切削痕の工具進入部に比べ、工具離脱部では主分力の割合が増加している(図 11(c) 右図の丸部)。また、脆性破壊の発生と切削抵抗への影響を調査するため、実験 6 の脆性モード面発生部の画像と切削抵抗を図 12 にまとめた。同図より、脆性モード面の発生による切削抵抗への影響は確認できなかった。なお、慣用切削でも同様に影響は確認出来なかった。これは、脆性破壊痕が被削材とすくい面の接触面積に対して小さいことや、被削材と動力計の間に試料台(材質:SS400)を介しているためであると考えられる。つまり、一部で脆性破壊痕が生じて、その他の延性モード面部分で工具すくい面が支持され、切削抵抗の変動が減少することや、その変動が試料台内で減衰したことで、切削抵抗の変動が動力計で検出されなかったのである。

Fig. 12 Effect of Brittle-mode surface on cutting forces

Fig. 13 The suppression effect of brittle-mode surface with thrust force directional vibration-assisted cutting

5. 脆性モード面抑制効果

前節で述べたように、背分力方向振動切削において延性モード面が増大することがわかった。そしてこの増大効果は、工具進入時に横クラックが緩和され、工具離脱時に横クラックおよびクラックが抑制されることで生じていた。これらの影響をもたらした要因について図 13 にまとめた。まず、工具進入時における横クラックの抑制効果は、背分力方向の振動に伴う切込み方向への切れ刃の動きによって、工具が被削材に進入し易いことが影響している。工具が被削材に切込み易くなることで、工具下方の被削材を押し続けることが無くなり、圧縮応力が緩和され、横クラックが抑制されたと推察できる。また、振動援用時の切削痕では、除去率の変化も同様の影響を受けている。ここで、横クラック発生の有無に関して最も重要なことは、切削開始時の切込み易さである。しかし、被削材の除去が始まる直前の切込み易さは除去率で評価することができない。除去率で評価しているのは除去が始まった後の状態であり、工具が被削材に貫入する可否を直接評価することは異なるためである。

一方で、工具離脱部では除去率が低下するため、横クラックは生じ易くなると考えられるが、実際は逆に発生が抑制された。これは工具離脱方向、つまり切り屑生成方向に工具が動くことで、せん断角が増加することや、背分力が負になることが要因である⁴⁾。すくい面付近で生じた負の背分力によって、工具切れ刃稜付近で生じる圧縮応力の最大値が減少したため、横クラックが生じなかったと考える。また、クラックに関しては、せん断角の増加に伴

い主分力が減少し、被削材を引っ張る力が減少したこと、低い除去率に伴って圧縮力が生じたことにより、工具離脱部でクラックの発生が抑制されたと推察した。しかし、図 11, 12 に示す工具離脱部では、負の背分力や主分力の減少は確認できない。これは、除去率が低下したことによって、工具逃げ面において被削材からの反力を受ける面積が増加して背分力の減少が抑制されたこと、摩擦面の増大に伴って摩擦力が増加したことが要因であると考えられる。

以上に述べてきた脆性モード面の抑制効果は、砥粒が同様の軌道を有する切込み方向振動援用研削加工においても生じていると考えられる。ただし、砥粒は形状や大きさが一様ではない。刃先稜半径が大きく横クラックを生じさせやすいものもあれば、砥粒自体が微小なために被削材に貫入し易く、横クラックが抑制されることも考えられる。目的で述べた切込み方向振動援用研削加工による延性モード面増大の要因をより明確にするためには、今後さらに工具の先端半径による影響等を評価する必要がある。

6. 結 言

切込み方向振動援用研削加工による延性モード面増大の要因を明らかにするため、合成石英ガラスに背分力方向振動切削を試みた。その結果、振動援用時に延性モード面が増大することや除去状態が変化することを実験的に明らかにした。主な結果を以下に記す。

- (1) すくい角-35° における切削加工では、クラックを伴う脆性破壊が生じるが、背分力方向振動切削の工具離脱部では、クラックの発生が抑制された。
- (2) 摩耗した工具を用いたすくい角-35° における切削加工では横クラックが生じたが、背分力方向振動切削の工具進入部と工具離脱部、特に後者においては、横クラックの発生が抑制された。
- (3) (1), (2) の抑制効果により、再研磨された工具を用いたすくい角-35° における背分力方向振動切削では、除去深さ 0.09~0.15μm において、慣用切削よりも延性モード面が増大した。
- (4) すくい角-65° の背分力方向振動切削では、1 つの切削痕内で除去率が約 35% から約 5% に変化した。
- (5) 背分力方向振動切削の工具離脱部では、(4) の除去率変化と、上向きの軌道に伴うせん断角の増加、負の背分力により、クラックと横クラックが抑制される。この効果は工具軌道に起因するため、切込み方向振動援用研削加工でも同様に生じ、延性モード面が得られ易くなったと考える。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 15K13850 の助成を受けたものである。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 今井健一郎, 橋本洋: 背分力方向振動を援用する延性モード加工—第 2 報 断続的な除去加工に関する実験的考察および多刃工具の提案—, 砥粒加工学会誌, **53**, 12 (2009) 745.
- 2) 閻紀旺, 庄司克雄, 厨川常元: 大きな負のすくい角工具による延性・ぜい性遷移, 精密工学会誌, **66**, 7 (2000) 1130.
- 3) 水谷勝己, 谷先盛彦, 田中芳雄, 井戸守: セラミックスの切削における材料除去 - 大規模破壊過程におけるクラック進展経路の線形破壊力学による考察, 精密機械, **49**, 4 (1983) 435.
- 4) 社本英二, 森本洋之, 森脇俊道: 楕円振動切削加工法 (第 1 報) —加工原理と基本特性—, 精密工学会誌, **62**, 8 (1996) 112.