

令和 2 年 9 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K14127

研究課題名(和文)カーフロスを考慮した鏡面切断ワイヤ工具の開発

研究課題名(英文)Development of wire tool by considering cutting surface

研究代表者

上村 康幸(kamimura, yasuyuki)

東京大学・生産技術研究所・技術専門職員

研究者番号：20396906

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：高価部品等の希少材料を無駄なく有効に活用するためには、加工表面の削り代や切断時の切断代を最小限に抑えることのできる工具の開発が必要である。切断面を鏡面化するためには、切断時に脆性破壊させないことである。そのためには、不均一な砥粒の切れ刃の突出し量を一定にする必要がある。そこで、芯線をPITに挿入し、その表面に同種のポリイミド液と研磨剤を混合塗布した工具を製造した。その結果、以下の結論を得た。提案した工具でガラスを延性切断できることを示した。切断の際は、エアの連続ブローと断続ミストの併用が有効である。PITに芯線を挿入したワイヤ工具は、断線を防止でき、細線化工具に有効である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

切断溝側面を鏡面化するためには、切断時に脆性破壊させないことである。芯線をPITに挿入し、その表面に同種のポリイミド液と研磨剤を混合塗布した工具は、バラツキの大きいダイヤ砥粒は初期接触時の研磨抵抗は小さいため、加工力を伴わず徐々に砥粒層に埋め込まれる。切込み量の増加に伴い、砥粒層は平滑化される。同時に突出した砥粒は均一化され、混入したセリア粒子の触媒効果と加工時の摩擦熱、イオン水によってケミカル作用が働き、切断面は鏡面化される。今後の工具開発では、切断面の鏡面化と同時に表面形状の向上がこれからの課題であり、切断時のミストの最適化が必要である。

研究成果の概要(英文)：The development of tools that can minimize them is required to effectively utilize rare materials used in expensive parts without waste. To realize mirror surface of the cutting surface, it is important to avoid brittle fracture during cutting. For that, the cutting depth of the cutting edge of nonuniform abrasive grains is necessary to make a constant. Therefore, a core wire is inserted into a polyimide tube (PIT), on which a mixture of a polyimide solution of a similar type to that of the PIT and abrasive grains was coated. As a result, the following conclusions were obtained. (1) ductile cutting of glass is possible using the developed tool, (2) the combined use of a continuous air flow and intermittent misting is effective during cutting, and (3) the tool obtained by inserting a core wire into a PIT is robust against breakage and the diameter of the tool can be reduced.

研究分野：固定砥粒加工

キーワード：ワイヤー 研磨剤 ポリイミドチューブ ポリイミド樹脂 切断 平滑化 固定砥粒

1. 研究開始当初の背景

ワイヤ工具は半導体用や光学部品の切断に欠くことのできない工具である。この工具は、遊離砥粒方式と固定砥粒方式があるが、切断面の粗さや能率によって仕分けされている。しかし、両工具ともに切断面のカーフロスの最小化(100 μm 以下)や鏡面創生といった挑戦的な研究報告例はない。これは、固定砥粒方式に言及すれば、現状の切断能率(サファイヤ切断の場合)を維持するために必要なワイヤの芯線径($\phi 150\mu\text{m}$)とこれに固着させる砥粒径($\phi 12\text{-}25\mu\text{m}$)の最適値を優先させているためである。芯線径を細くし極細粒を使用すれば、カーフロス・粗さは向上する。ところが極細線は、工具剛性を低下させ、切断精度の低下や断線を引き起こす。極細粒の固着は、能率は低く短寿命である。そこで、高価な材料を最小限の切断幅で且つ鏡面化させる方法として、極細線で高強度の CFRP 長繊維を電着ワイヤに採用し、Ni 粒子の螺旋めっきと機械的研磨を促す水溶性混合充填剤を組み合わせた固定砥粒ワイヤ工具を開発する(図 1)。申請者は固い砥粒に弾性を持たせたメディア砥粒工具を電着により製造し、粗面ガラスの鏡面研磨を実現した[1][2]。弾塑性体工具の狙いは、鏡面化を優先させクラックを起さずに切断することである。クラックは鏡面創生のリスクとなる。そのため現状の工具では、機械研磨の後工程が必要となる。開発する工具は、極細線のワイヤに Ni 粒子を螺旋状に析出させた電着層と PTFE の水溶性樹脂にダイヤとセリア粒子(化学的作用の促進)を混入した充填層(砥粒層)から構成されている。電着層の役割は、充填剤のサポートである。充填層は、加工の進行に伴って平滑化され、樹脂の弾性・塑性変形により不揃いの砥粒は均一化される(図 1(c))。これによりクラックを防止できる。これが切断時の鏡面創生において重要となる。充填層が平滑化されれば、力が分散し、低剛性のワイヤ工具でも鏡面化できると考える。

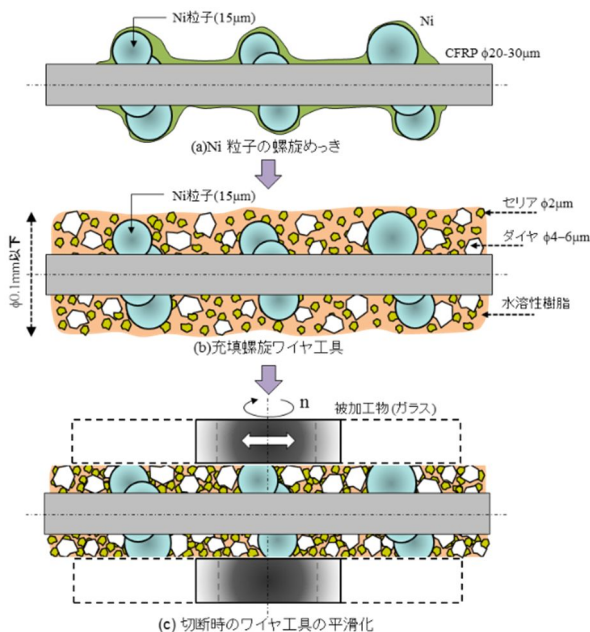


図1 砥粒突起高さの均一化

2. 研究の目的

本研究の目的は、脆性材料を 100 μm 以下のカーフロス(切断幅)でクラックを起さず鏡面創生できる固定砥粒切断ワイヤ工具の開発である。ワイヤには、極細線で高強度の CFRP 長繊維を採用し、充填剤のサポートを担う粒子で螺旋めっきする。この工具の役割は、極細線でも断線し難いこと、弾性・塑性変形する充填層の平滑化で不均一な砥粒を均一化すること、切断時の抵抗を分散させ砥粒切込み深さを小さくすることである。切断幅の最小化と同時にクラックフリーの鏡面化を目的とした切断ワイヤ工具の開発は、機械研磨の一つの工程を取捨する狙いもあり、高額部品等の高精度加工への挑戦である。

3. 研究の方法

(1)平成 28 年度は、1)複合めっき装置の作製、2)CFRP ワイヤの複合めっき、3)螺旋めっきワイヤ(CFRP, SUS, Brass など)の作製方法などについて、検討する。

1) 現在、ワイヤ工具の芯線に使用する CFRP 線の入手を検討中であるが、難しい場合は、SUS、ブラスメッキ銅線を使用する。芯線径はいずれも $\phi 20\text{-}30\mu\text{m}$ 、作製する工具長は Max100mm、浴槽は $\phi 200\text{mm}$ 以上の円形を用い、めっき浴には、砥粒の分散剤やメディア砥粒の複合めっきに効果があったスルファミン酸 Ni を採用する。これらを考慮した複合めっき装置を製造する。

2) Ni 粒子やセリア砥粒の添加量や電流密度、めっき時間によって電着層の析出状態は制御できるが、粒子径と同程度の芯線径では、未知であり、検討する必要がある。析出後の径のばらつき程度によっては、粒子径の選定が必要である。小さくなれば充填剤のサポート力が低下することも想定されるため、検討する。CFRP 線を入手できるか現段階では、分からないが、代替線として、SUS、ブラスメッキ、銅線で十分対応可能である。

3) 螺旋めっきワイヤ(CFRP, SUS, Bras, 銅など)の作製方法 選定した粒子径で螺旋の複合めっきを試みる。複合めっきは、1)で製作しためっき装置を使用する。粒子を螺旋状に析出させるために、コイル形状のばねの中心に芯線を通す。コイルがマスク材となることで、粒子の螺旋めっきが可能であると考えている。めっき時はコイルと芯線を同期させて回転させることで、均一な析出が可能である。複合めっき後の工具径は、芯線径が $\phi 20\text{-}30\mu\text{m}$ であることを考慮して、 $\phi 0.1\text{mm}$ 以内に抑える。

(2)平成 29 年度は、4)水溶性混合充填剤の検討、5)充填剤の保持強度対策(中空チューブの有無)、6)螺旋めっきワイヤの挿入方法、7)樹脂製中空チューブへの充填方法(水溶性混合剤)、8)充填中空チューブの細線化、9)切断面のカーフロスと粗さの評価について、検討する。

4) 螺旋状の電着層に不均一砥粒の均一性を目的とした水溶性混合樹脂を塗布あるいは充填する場合、混合する水溶性樹

脂・砥粒径・イオン水などの量によって粘性が変化する。特に中空チューブに充填する際は、充填性を考慮して砥粒の砥粒率について検討する。砥粒には機械的研磨が主体となるダイヤと化学的効果を促す触媒剤のセリアを、水溶性樹脂には弾性・塑性変形を利用した PTFE を採用するが、粒径や砥粒種、PTFE の希釈率について検討する。

5) 充填剤の保持強度対策 (中空チューブの有無) 充填層(水溶性混合樹脂)の保持強度は、面精度・能率・工具寿命において、とても重要である。塗布後の充填層の密着性や強度が低下すると、切断時に層が剥離し、クラックや工具断線を誘発する。充填層の強度対策として、塗布以外に、水溶性混合樹脂を中空チューブに充填したワイヤ工具を作製する。この工具のチューブのみをダイスで引き抜きあるいはプラーを使用して引き伸ばし、目的の径まで細線化する。塗布型と充填型の切断ワイヤ工具を製造し、剥離性、引っ張り強度、充填層内の混合剤の分布などについて比較検討する。

6) 充填層(水溶性混合樹脂)の保持強度を上げるために、粒子の螺旋めつきを施した螺旋ワイヤを樹脂製の中空チューブに挿入する。その手順は、芯線の中空チューブに挿入する、挿入した芯線に螺旋複合めつきする、螺旋めつきワイヤをチューブに挿入し、完成させる。

7) 樹脂製中空チューブへの充填方法 (水溶性混合剤) 充填の難易度は採用するチューブの内径によるが、小さいほど良いため、選定する必要がある。充填方法は、真空式や加圧式あるいは毛細管現象を利用することを考えている。その他の方法も必要であるが、現在、検討中である。

8) 螺旋の複合めつきでは、Ni 粒子($\phi 15\mu\text{m}$)以外にセリア砥粒($\phi 2\mu\text{m}$)の工具も作製する。充填剤に添加するセリアとサポート材として用いたセリア砥粒で作用砥粒数が上がれば、化学的研磨効果の増大も期待できる。そこで、6)と 7)の工程を経て作製した 2 種類の樹脂充填ワイヤをダイス(あるいはプラーに固定)に挿入し、チューブのみを引き抜く(冷間)ことで、細線化した切断ワイヤ工具を作製する。チューブに展延性を与えるために熱間引き抜きも検討する。引き抜き後のチューブの厚みは可能な限り薄い方が良いが、 $10\mu\text{m}$ 以下で調整する。厚みは工具の断面をとって確認する。

9) 以上の工程を経て作製した工具を使用し、ガラスの切断実験を行う。切断実験は、作製した 100mm 長の工具に断線しない程度のテンションを加え、高速回転させたガラス($\phi 10\text{mm}$)に往復運動と切り込みを与えながら、クラックフリーの鏡面切断をする。切断面のカーフロスと粗さについて評価し、切断条件の最適化を図る。

(3) 平成 30 年度は、10)最適化した切断ワイヤ工具を使用し、クラックフリーの鏡面創生を行いながら、切断能率と工具寿命について検討する。11)そして、ガラスやその他の単結晶材料の切断実験を行い、それぞれの研磨メカニズムを解明する。

4. 研究成果

(1) 緒言

高額部品等の希少材料を無駄なく有効に活用するためには、加工表面の削り代や切断時の切断代を最小限に抑えることのできる工具の開発が必要である。ガラスなどを脆性破壊させながら切断するワイヤ工具は、固定砥粒方式に言及すれば、能率が高い分、切断面は梨地面となり粗さは悪い。これは、現状の切断能率を維持するために必要なワイヤの芯線径と、これに固着させる砥粒径の最適値を優先させているためである。このような粗面な状態を高精度な面まで仕上げようとすると、除去量は必然的に多くなっていく。これまで固い砥粒を水溶性の樹脂に混入させた二層構造の固定砥粒工具で粗面ガラスの鏡面研磨を実現している [1][2]。これは、不均一な砥粒の切れ刃が低硬度の砥粒層に埋め込まれ、層が平滑化されることで、切れ刃の突出し量が一定になるためである。

そこで本研究では、粗面ガラスの鏡面化に効果が見られた低硬度の砥粒層を応用して、切断面の鏡面化を試みた。工具は、芯線挿入した樹脂製のチューブ表面に PTFE の水溶性研磨剤を塗布し焼結した。溝の鏡面化は可能であるが、切込み量が増えると砥粒層の減耗が早くなり断線する。早い減耗は、水溶性研磨剤の砥粒保持力が加工圧と摩擦熱により低下し、脱粒によって砥粒層が削られるためである。そこで、耐熱性に優れセミドライ加工時に減耗し難いポリイミドチューブ(以下 PIT と記す)を採用し、その表面に同種のポリイミド液と研磨剤を混合塗布した工具を作製し、鏡面化と切断の両立について検討した。

(2) 固定砥粒ワイヤ工具

2.1 工具の概念 溝側面を鏡面化するためには、切断時に脆性破壊させないことである。図 2 に示した低硬度の砥粒層は有効であるが、摩耗が早く断線する。そこで、図 3 に示した芯線を PIT に挿入し、その表面に同種のポリイミド液と研磨剤を混合塗布した工具を製造した。この工具の概念は図 2 の研磨プロセスと同じである。使用するダイヤ砥粒のばらつきは大きい。初期接触時の研磨抵抗は小さいため突出し量の大きい砥粒は、加工力を伴わず徐々に砥粒層に埋め込まれる。ワイヤ工具の切込み量の増加に伴い、砥粒層は平滑化され、層の強度も上昇してくる。同時に不均一な砥粒の切れ刃の突出し量は均一化され、混入したセリア粒子の触媒効果と加工時の摩擦熱、セミドライ時のイオン水によってケミカル作用が働き、溝や側面には軟質の水和層が生成される [3]。

2.2 工具構造および作製 表 1 に提案したワイヤ工具の製造時の仕様を示す。芯線($\phi 0.09\text{mm}$)を挿入した PIT(内径 $\phi 0.12\text{mm}$)の表面に、ポリイミド液と研磨剤を混合塗布した。ポリイミド液には溶剤を加え、研磨剤にはダイヤとセリアを加え、表 1 の条件で両者を混ぜて砥粒層を形成させた。その後、図 4 のキュアパターンで焼結し工具を完成させた。ベース材の PIT は、研磨剤の接着力を高めるためと芯線への砥粒の食い込みを抑え工具の断線を防止するためである。

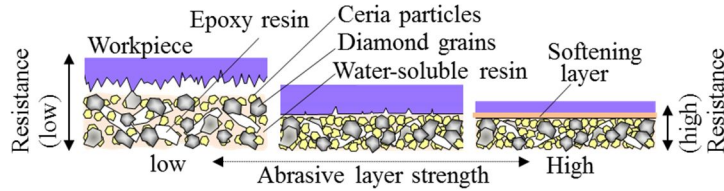


図2 研磨プロセス(結合剤:水溶性樹脂)

(3) 円筒ガラスの切断

3.1 砥粒添加量と工具摩耗 表2に示した条件で研磨剤

の添加量について、砥粒層の減耗と加工面の状態を比較した(図5). 工具張力は10-11Nに固定し、切込み量 C_y 100 μ mにした. 円筒ガラスのワークは27000rpmで回転させ、送り速度 $V_x=20\mu$ m/sでX方向に0から40mmまで往復移動させた. ミストは $x=1$ mm毎に断続で供給した. 加工面は延性面であるが、ダイヤの添加量の違いで砥粒層の摩耗量に差異が生じた. 2gでは減耗は少ないが、加工面は悪くなる傾向がみられる. これは、砥粒層の硬度が高くなり、力の分散性が低下したためである. 0.5gでは、作用砥粒数の過少により溝深さは小さい(図6). ダイヤの添加量は、切断面の粗さと除去量を考慮して1gに決定した. 図5で使用した3種類の工具は、摩耗が芯線に達した直後、断線した. そこで、芯線をPITに挿入した工具を作製し、以下の実験を試みた.

3.2 砥粒層減耗の要因 砥粒層の減耗は、切断時の断続ミストによる摩擦熱が原因である. この熱により切れ刃の摩滅が早くなり、砥粒が脱落し易くなる. 脱粒が起これば砥粒層が削られ、工具摩耗は早まる. しかし摩擦熱は、加工面の水和層を形成させるうえで重要であり、セリア粒子の触媒効果とイオン水の併用でケミカル作用を起こすためにも必要である. そこで、切断時の加工液を少量の連続ミストにして、切断を試みた(図7の上図). 工具は、図3に示した構造で、砥粒層はポリイミド液とダイヤ1gを混合塗布した. 連続ミストの場合、断続ミストでは不可能だった切断が可能となった. しかし切断面は、断続ミストでは延性面となるが、連続では脆性面となる. 連続のミストでは、摩擦熱が奪われ、摩滅が減少することで、砥粒層の摩耗が緩和された. 逆に、摩擦熱の低下によって水和層は減少あるいは消滅し、脆性面となった. そこで、鏡面と切断を両立させるため、連続ミストの代替に、連続

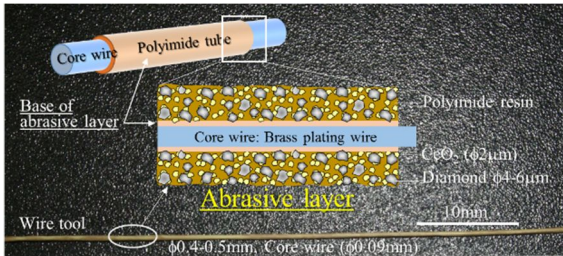


図3 提案した固定砥粒ワイヤ工具の構造

表1 工具の仕様

Tool	Core wire (mm)	Insert tube (internal)	Composition of abrasive layer	Baking
Brass plating (phi 0.09mm)	Polyimide (phi 0.12mm)	Polyimide resin + solvent	1:0.5, 1:1	Max 350°C
		Diamond (phi 4-6um)	0.5, 1, 1.5, 2g	
		CeO2 (phi 2um)	2g	

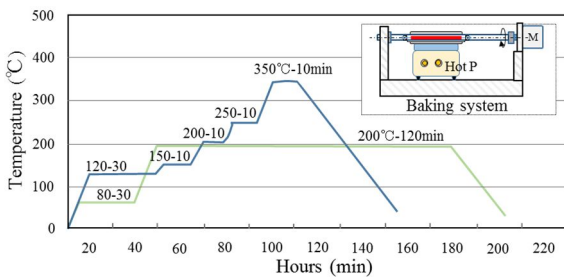


図4 ワイヤ工具のキュアパターン

表2 加工条件

Tool tension	10-11N	Cutting mode
Wire tool cutting depth C_y	100 μ m	
Workpiece and revolution	Borosilicate glass, 27000rpm	
Work moving distance	0-40mm	
Work feed rate V_x	20 μ m/s	
Mist: semidry (ion-water + aqueous cleaner)		

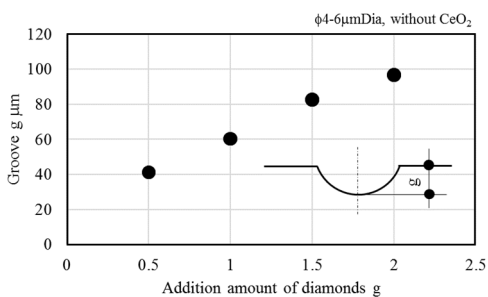


図5 砥粒添加量による砥粒層の減耗と加工面

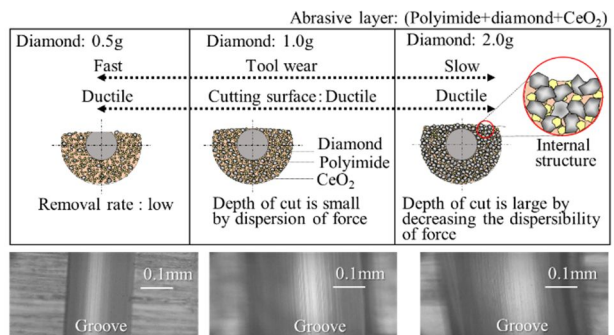


図6 砥粒添加量に対する切断溝深さ

エアと断続ミストを併用した(図 7 の下図) . その結果、溝と切断面は、延性面が得られた . この供給方法で、ケミカル効果に必要な熱・加工液が確保され、鏡面切断できることが分かった . 連続エアは熱放散を小さく抑えられる . また、芯線を挿入した PIT の工具は、使用中断線しなかったことから、この工具の有効性が得られた .

3.3 セリア粒子の効果 セリアなしの工具で延性面の切断は可能であるが、研磨面に近い鏡面を得るために、セリア粒子の効果について検討した(図 8) . セリアの効果を引き出すため、ダイヤモンドの添加量は最少の 0.5g にした . 共に延性面であるが、セリアなしの場合はスクラッチが発生した . 一方セリア有の場合は、研磨面とはならず、安定した研削痕であった . セリア砥粒の有効性については、砥粒層の減耗対策を講じた段階でさらに検討する必要がある .

(4) 細線ワイヤ工具

図 3 に示す同じ構成の細線工具を作製した . ダイヤモンド砥粒の添加量は、研磨層の平滑性を考慮して 1g とした . セリア粒子は 2g 添加であった . 作製した細線工具φ0.25-0.3mm で円筒状のガラスを切断してみた (図 9) . 切断条件は表 2 の通りである . 使用ツールの条件を同図の上を示す . その結果、上下の切断面の状態に差が見られた . 切断面は延性面であるが、表面形状の低下は、工作物の高速回転による工具の振動と工具径のばらつきに起因するものである . PIT に芯線を挿入した細線工具は、使用中、断線しなかった .

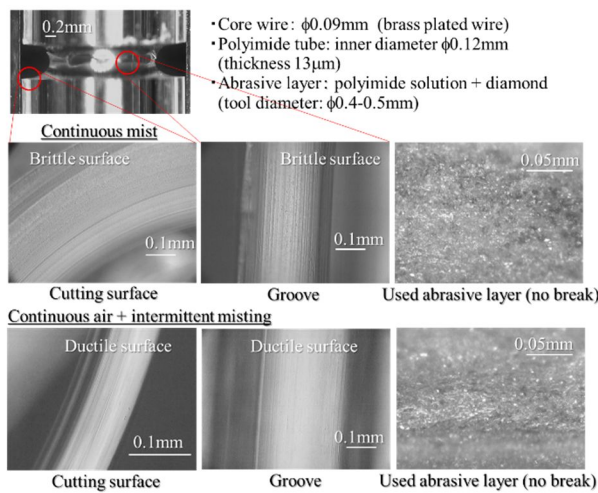


図 7 円筒ガラスの切断面

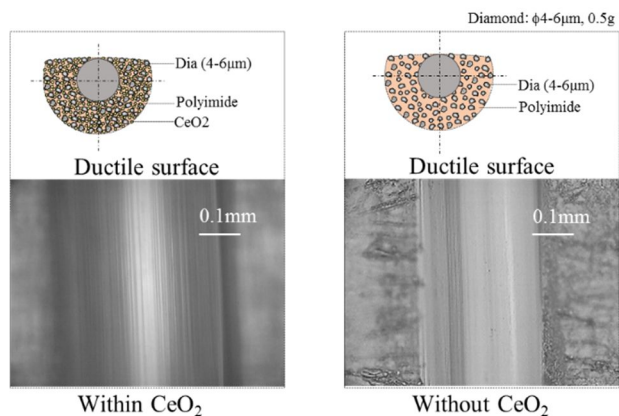


図 8 セリア有無による加工面

(5) 結言

耐熱性に優れた PIT にポリイミド液と研磨剤を混合塗布した工具を作製し、ガラスの鏡面切断を試みた . その結果、提案した工具でガラスを延性切断できることを示した . 切断の際は、エアの連続ブローと断続ミストの併用が有効である . PIT に芯線を挿入したワイヤ工具は、断線を防止でき、細線化工具に有効である .

ワイヤ工具の開発では、切断面の鏡面化と同時に表面形状の向上がこれからの課題であり、切断時のミストの最適化が重要なポイントとなる . また、砥粒層の減耗対策が不十分で切断能率が低いため、砥粒層の強度対策を講じた工具開発を進める必要がある .

参考文献

- [1] 上村康幸、土屋健介：砥粒加工学会講演論文集、(2016), 244-245.
- [2] Y. Kamimura, K. Tsuchiya: Element technologies of fixed-abrasive tools with a spiral wire used for high-precision machining, Proc. of 14th, euspen, 6, (2014), pp. 47-50.
- [3] T. KURITA et al.: Development of new combined polishing process for single crystal silicon carbide, JSAT, 1, (2014) pp. 30-35.

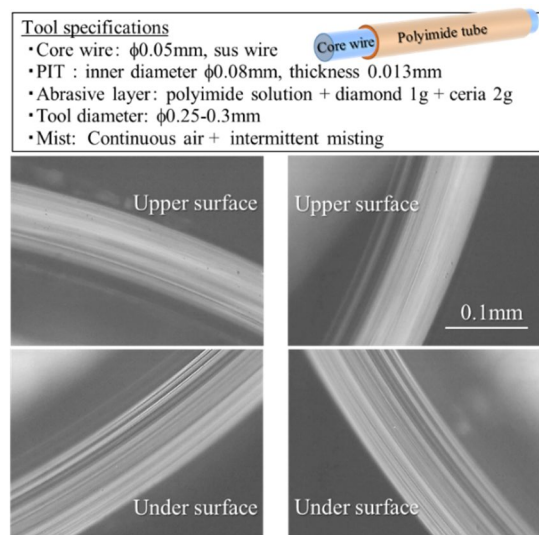


図 9 上下面の切断面の違い

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Y. Kamimura and K. Tsuchiya
2. 発表標題 Proposal of fixed abrasive wire tool for thin wires considering mirror cutting
3. 学会等名 euspen19th (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上村康幸、土屋健介
2. 発表標題 鏡面切断を考慮した固定砥粒ワイヤ工具の提案
3. 学会等名 砥粒加工学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上村康幸、土屋健介
2. 発表標題 鏡面切断を考慮した細線用固定砥粒ワイヤ工具の開発
3. 学会等名 総合技術研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上村康幸、土屋健介
2. 発表標題 鏡面切断用固定砥粒ワイヤ工具の開発
3. 学会等名 IMEC
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上村康幸・土屋健介
2. 発表標題 鏡面切断用固定砥粒工具の提案
3. 学会等名 砥粒加工学会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	土屋 健介 (Tsuchiya kensuke) (80345173)	東京大学・生産技術研究所・准教授 (12601)	