

マイクロダイヤモンド工具再生のための レーザ誘起エッチングシステムの開発

国立研究開発法人理化学研究所

専任研究員 片平 和俊

(平成 24 年度一般研究開発助成 AF-2012205)

キーワード：ダイヤモンド工具，レーザ，エッチング

1. 研究の目的と背景

近年、携帯情報端末や LED 向け電子部品などの微細金型加工のニーズが益々増加する中、小径で高精度なマイクロツールを用いた超精密加工技術の達成精度レベルの更なる漸進が迫られている。マイクロ加工が要求される素材としては、超硬合金、ステンレス鋼、単結晶シリコン、炭化珪素等の難削・硬脆材料が多い。

一方、精緻で多彩な形状を有する多結晶ダイヤモンド (Polycrystalline Diamond: 以下 PCD) 工具が、ハイグレードな高効率マイクロ加工用工具として注目されている。PCD は劈開性や硬度の異方性がなく、化学的にも安定であり、ワイヤー放電加工により複雑形状の微細工具を効率よく作製することができる。同工具を用いることにより、超硬合金やセラミックスなどの硬脆材料に対し、鏡面性を有する微細形状加工が達成できており、工業的にも一定の成果が得られつつある。しかしながら、加工のフロントで起きている現象、すなわち PCD の 1 μm 以下のダイヤモンドが硬脆材料を延性モードで加工できるメカニズムに関しては、学術的にも工業的にも不明瞭な点が多く残されている。とくに、微細工具の表面に付着する切り屑付着の問題が実際の製造現場で生産性を阻むボトルネックとなっている。すなわち、加工中に発生する数十 nm サイズの切り屑が工具の表面に積み重なり、化学反応によって強固な付着膜として残留してしまうために、工具の切削能力が著しく低下する。マイクロ加工用工具の劣化防止や加工効率の向上のためには、画期的なツール表面性状再生技術 (ツールリコンディショニング) の開発が急務といえる。

本研究では、まず、アルカリ溶液を用いた電解作用の援用によるツールリコンディショニング技術の開発に取り組んだ。一方、電解援用によるリコンディショニング方法は、導電性を有さないナノ多結晶ダイヤモンド、単結晶ダイヤモンドツールには適用できない。今後は幅広いワーク材質かつツール材質を見据えた、拡張性の高いツールリコンディショニング技術の開発が求められる。よって、ナノパルスファイバレーザによる局所領域のエッチング法の開発も行った。

2. 電解援用工具リコンディショニングの開発

SiC の長時間加工に使用した PCD 工具表面に対し、SEM 観察および EDS 元素分析を行った結果を図 1 に示す。

とくに工具のエッジおよび底面部に付着物が確認できる。これは、加工中に発生する数十 nm サイズのチップが工具の表面に積み重なり、化学反応によって強固な付着膜として残留してしまったものと考えられる。なお、EDS 元素分析の結果、この付着物は、被削材である SiC 由来の Si 系酸化物 (主に SiO_2) であると考えられる。

このマイクロレベルの工具付着物に対して、ブラシや超音波洗浄などという従来の機械的除去方法は全く効果がないため、これまで工具を再生利用できず、交換廃棄する以外に方法がない状況であった。工具の劣化防止や加工効率の向上のためには、画期的な工具リコンディショニング技術を開発する必要がある。本研究では、アルカリ溶液を用いた電解作用の援用による工具リコンディショニング技術の基礎実験の試みについて述べる。

PCD マイクロ工具表面に付着するチップの高効率除去を目的として、図 2 に示す電解援用リコンディショニングユニットを作製し、表 1 に示す条件で基礎実験を行った。すなわち、カーボンブラシを介して工具側に陽極を与え、先端部のみを溶液に浸漬した。また、NaOH 溶液内に銅製のリング状電極を浸漬させ、これを陰極とした。電解電源は直流電源を使用し、電圧値は 10V 一定とした。なお、電解処理中に工具と電極間に流れる実電流値は 0.02A であった。電解実験 30 秒後の工具の様子を図 3 に示す。SEM 観察および EDS 元素分析より、工具表面を覆っていた Si 系付着物は除去されていることが確認できる。アルカリ溶液中における電解作用によって、付着物の SiO_2 と NaOH が反応し、付着物が除去されたと考えられる。また、水の電気分解により発生した水酸化物イオンが電気泳動によって陽極側に引き寄せられるより、化学反応を促進したと考えられる。

なお、リコンディショニングを施した工具の加工性能を確認するため、図 3 に示したリコンディショニング済の工具を用いて、深さ 50 μm および 20 μm の二つのウェルが重なった段付きマイクロウェル加工を行った。その結果を図 4 に示す。同図より、二つのウェルの加工深さは概ね設定値通りであるとともに、ウェル底面部の表面粗さも R_a で 4.1 nm が得られていることから、リコンディショニングを行うことにより工具の

切削性能が回復されたものと考えられる。本手法では、工具表面において、付着したミクロンサイズのチップの電解反応をいかに精緻に制御できるかが重要となる。

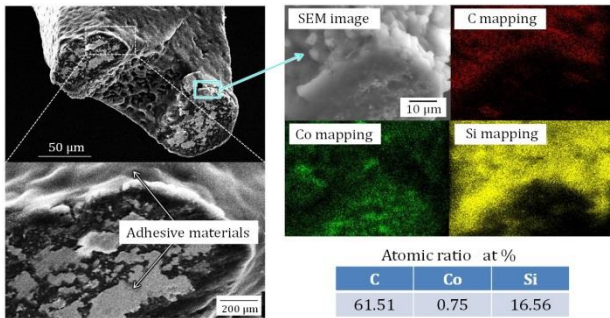
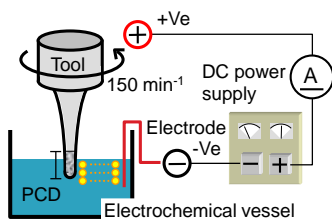
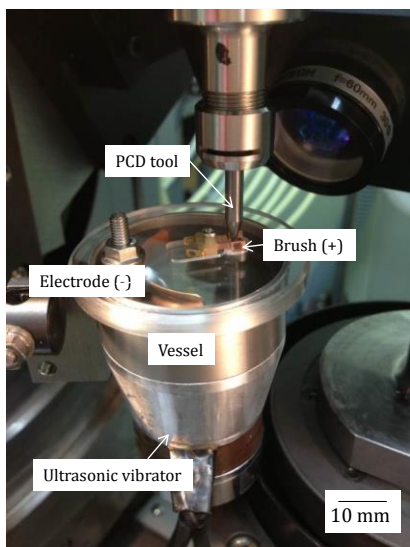


図1 SiCの長時間加工に使用したPCD工具表面のSEM観察およびEDX元素分析結果



Applied voltage : DC10V (DC power supply)
 Solution : Distilled water + Sodium hydroxide (NaOH)
 Electrical conductance ; 10.18 mS/cm
 pH; 8.6 alkaline
 Electrode : Copper

図2 電解援用リコンディショニングユニット

表1 電解条件

Solution	Distilled water + 0.3% Sodium hydroxide (NaOH)
Electrical conductance	10.18 mS/cm
pH	9.2
Applied voltage	DC10V (DC power supply)
Electrode	Copper
Temperature	20 deg C

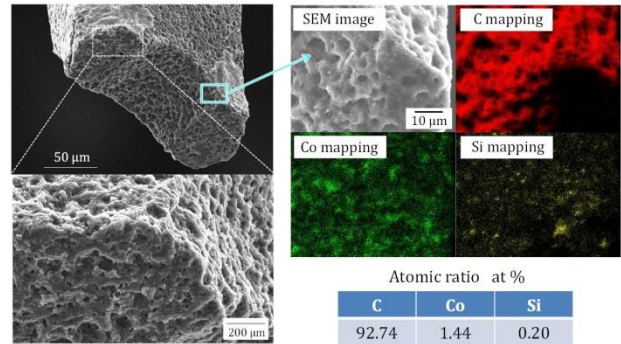


図3 リコンディショニング後の工具の様子

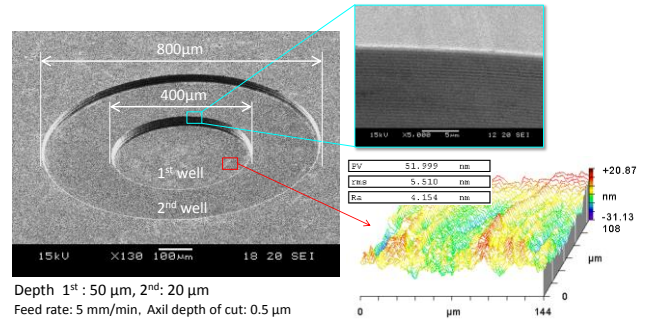


図4 リコンディショニング済の工具を用いて段付きマイクロウェル加工を行った結果

3. レーザ誘起局所エッチングの基礎実験

前節では、電解作用によるエッチング効果により、工具表面の付着物が効果的に除去できることを確認した。一方、電解援用によるリコンディショニング方法は、導電性を有さないナノ多結晶ダイヤモンド、単結晶ダイヤモンドツールには適用できないため、今後は幅広いワーク材質かつツール材質を見据えた、拡張性の高いツールリコンディショニング技術の開発が求められる。ここでは、ナノパルスファイバレーザを用いた局所エッチング法の開発にも着手する。レーザの利点は、照射した箇所だけに処理を行えることである。第一段階として、レーザ照射により与えられる熱を利用して、金属イオンを含有した溶液中に浸漬させた被処理材の表面を加熱することにより、局所的にエッチングすることを試みた。

3. 1 使用装置および実験条件

装置のメインフレームとして、超精密5軸加工機 (NANO100 Sodick) にパルス発振ファイバレーザユニット (YLP-1 IPG.co, 波長 1064 nm, パルス幅 100 ns) を図5のように取り付けてレーザ照射を行った。φ15 mm × t4 mmの円盤形状のSUS316L材に耐水研磨紙およびアルミナ懸濁液により鏡面仕上げを行い、試験片とした。この試験片を図6のようにステージ上面に取り付け、Al (NO₃)₃ 溶液に浸漬させた。ステージは治具中央部に設けたネジ部により高さの微調整が可能となっており、試料面からの液面高さ調整が精密に行える。本実験では液面高さを1 mmに設定した。レーザの照射条件について、表2に示す。また、使用した溶液の濃度は1%及び10%とした。1%溶液を用いてレーザ照射を行った試

験片を C1 series, 10%溶液を用いた試験片を C10 series とした. レーザ照射後, SEM を用いて試験片表面の観察および元素分析を行った. また, 照射面を切断し, FE-SEM により断面方向の元素分析を行い, Al 成分の挙動について検討を行った.

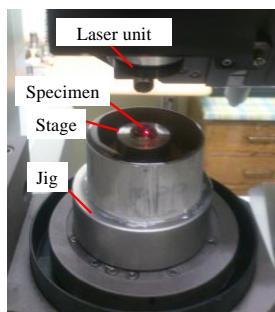


図5 装置の外観

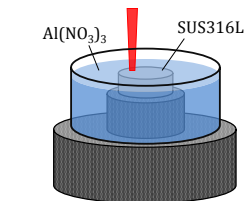


図6 試験片を浸漬およびレーザー照射のイメージ

表2 レーザ照射条件

Power	9 W
Beam diameter	10 μm
Scan rate	50 mm/min

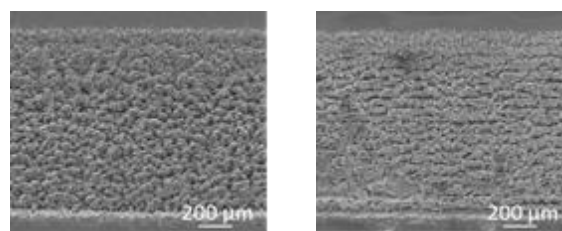
3. 2 レーザ照射によるエッチング層形成

図7にSEMを用いてレーザー照射後の試験片表面を観察した結果を示す. 同図よりC1 seriesとC10 seriesのどちらもレーザー照射により表面が加工されている様子が認められる. また, 照射領域の表面粗さを測定したところ, C1 seriesが Ra 6.62 μm , C10 seriesが Ra 8.73 μm となっており, C10 seriesの方が表面の粗さが大きくなっており, このことは, 溶液濃度がレーザー照射による反応に影響を及ぼすことを示している.

次に, レーザ照射面のEDXによる元素分析を行った結果を図8に示す. 比較として, 照射前のSUS316L材の元素分析の結果も示した. 同図より, レーザ照射前にはほとんど含まれていなかったAl, O成分がレーザー照射後に増加し, SUS316L材に元から含有していたFe, Cr, Ni成分が減少していることが分かる. これは, レーザ照射によって, 加工が行われ, 試験片表面に酸化物が形成されたのと同時に, $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 溶液中に含まれるAl成分が試験片表層部に拡散されたことを示唆している. また, C1 seriesとC10 seriesを比較すると, C10 seriesの方がAl成分とO成分の濃度が大きくなっていることが分かる. 特に, C10 seriesでは, SUS316L材由来の成分よりもAl成分とO成分の割合が大きくなっており, 強い表面反応があったと考えられる.

さらに, 拡散層の有無について検討するため, 試験片を切断し, 深さ方向断面のSEM観察像及び, EDXによるAl成分とO成分, Fe成分のマッピング分析を行った. その結果を図9に示す. 同図より, レーザ照射後にAl成分とO成分が基材表面だけでなく, 基材内部にも存在しており, 拡散現象が起きていることが分かる. 特にC10 seriesでは, C1 seriesと比較して, O成分の

拡散深さはあまり変わっていないが, Al成分の拡散深さが大きくなっていることが分かる. このことから, O成分とAl成分の反応は異なるメカニズムにより, 生じていることが示唆された.



a) C1 series b) C10 series

図7 レーザ照射後の試験片表面のSEM観察結果

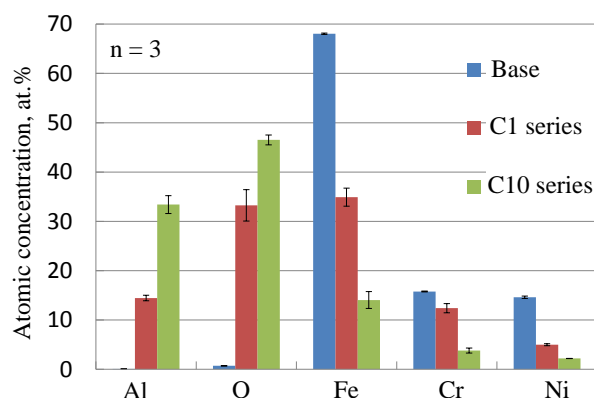


図8 EDXによるレーザー照射面の元素分析結果

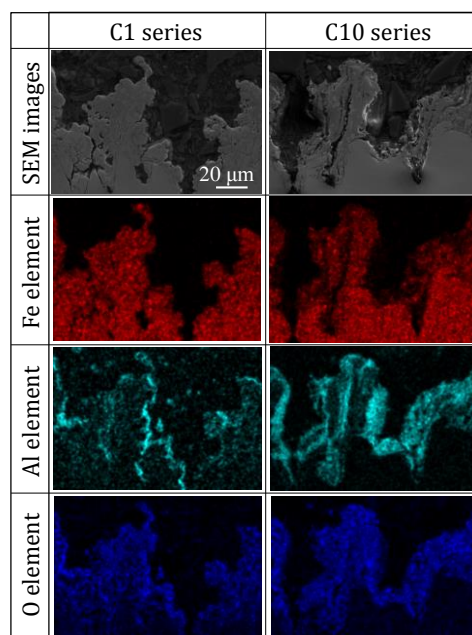


図9 試験片深さ方向断面のSEM観察像およびEDXによる元素マッピング

4. 今後の展開

本研究で得られた基礎実験結果に基づき, 今後は, 工具表面に付着するチップの高効率除去を目的として,

図10に示すイメージのレーザー誘起エッチングを援用したツールリコンディショニングユニットを開発する。具体的には、使用後のツールの先端部を、アルカリ基 (KOH もしくは NaOH) 溶液で満たした専用の小型シンクに浸し、集光させたレーザーを側面から照射し、レーザー誘起作用により溶液中の塩基と W 系酸化物の化学反応を促進させる。ファイバレーザーを用いることにより、自由に取り回しすることができ、焦点光学系のみをシンク側壁にコンパクトに組み込むことができる。なお、レーザーは上面から照射し、シンク底に設置したミラーで全反射させ、ツール先端前面に照射することも可能である。同ユニットを加工機上に搭載することで、ツールの切れ味をモニタリングしつつ最適なタイミングで、ツールを加工機から取り外すことなく、迅速にリコンディショニングを行うことが可能となる。なお、ツール表面において、付着したミクロンサイズのチップの化学反応 (例えば、 $WO_3 + 2NaOH \rightarrow Na_2WO_4 + H_2O$) をいかに精緻に制御できるかがカギとなる。使用するレーザーのエネルギー強度、焦点距離、およびアルカリ基溶液の液種、濃度、液温、これらすべての要素と、レーザー誘起エッチングによるリコンディショニング特性との相関を実験的にパラメトリックに検証して最適条件を導出する。最終的に、微細光学素子金型、バイオデバイス金型 (μTAS など) を加工し、本手法の優位性を確認する。

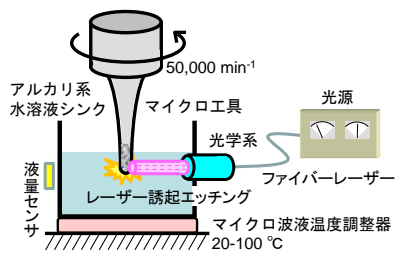


図10 機上レーザー誘起エッチングシステムの概念

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団に一般研究開発助成として採択されたものであり、同財団からの研究助成に対し心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Kazutoshi Katahira, Shogo Takesue, Jun Komotori, Kazuo Yamazaki, Micromilling characteristics and electrochemically assisted reconditioning of polycrystalline diamond tool surfaces for ultra-precision machining of high-purity SiC, *Annals of the CIRP*, 2014, 63/1, 329-332.
- 2) 片平和俊, 武末翔吾, 渡邊健志, 小茂鳥潤, PCD 微細エンドミルによる SiC の加工特性と電解援用リコンディショニング, 砥粒加工学会誌, 2014, 58/9, 577-582.
- 3) S. Takesue, K. Katahira, J. Komotori, A study on PCD tool surface reconditioning technique for SiC micromachining, *Procedia CIRP*, Vol. 14, (2014), pp. 355-359.
- 4) 片平和俊, 小茂鳥潤, 渡邊健志, 多結晶ダイヤモンド工具による硬ぜい材料の高品位微細加工, *NEW DIAMOND* 誌, 第 111 号, Vol. 29 No. 4, 17-21.
- 5) 江面篤志, 良峰皓, 片平和俊, 小茂鳥潤, レーザ誘起湿式局所改質法の開発 - ステンレス鋼表面における硝酸アルミニウム溶液の反応挙動, 精密工学会学術講演会講演論文集 2014 年度精密工学会秋季大会, 鳥取, 2014 年 9 月
- 6) 良峰皓, 江面篤志, 片平和俊, 小茂鳥潤, レーザ誘起局所改質処理における照射出力と走査速度が被処理面性状に及ぼす影響, 精密工学会学術講演会講演論文集 2014 年度精密工学会秋季大会, 鳥取, 2014 年 9 月