

平成 30 年 6 月 9 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03906

研究課題名(和文) 微細ダイヤモンド工具の加工性能最大化のためのプラズマ援用クーラントシステムの構築

研究課題名(英文) Improvement on cutting performance of micro-diamond tool by plasma assisted coolant system

研究代表者

片平 和俊 (Katahira, Kazutoshi)

国立研究開発法人理化学研究所・大森素形材工学研究室・専任研究員

研究者番号：70332252

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：大気圧プラズマジェットを加工点に対し照射することで、加工中のクーラント効果を促進させ、微細ダイヤモンド工具の加工性能最大化を狙った。高純度SiCに対し、プラズマ援用クーラントを用いてダイヤモンド微細ミーリング加工を行った結果、平均表面粗さで1 nm以下という極めて高品位な表面が得られた。プラズマジェットを援用することで、付着物の抑止に甚大な効果があるため、工具寿命改善・加工能率の向上が見込まれる。

研究成果の概要(英文)：The feasibility of atmospheric-pressure plasma jet processing for improving cooling during SiC micro-milling was investigated. A comparison was made between SiC surfaces after milling, with and without the application of the plasma jet. The application of a plasma jet was found to result in a nano-level surface roughness. The Ra value of a surface machined with plasma jet assisted cooling remains approximately 1-2 nm for longer machining distance. The adhesion materials on the tool surface were suppressed over long machining distances when using the plasma jet. The plasma jet treatment is believed to result in an increase in hydrophilicity due to a surface modifying mechanism, wherein OH and N radicals are created by the plasma irradiation. The plasma jet appears to be highly effective at improving both the chip formation process, by imparting hydrophilicity to the tool and workpiece surfaces, and removing surface contamination at the tool edge during machining.

研究分野：超精密切削・研削，表面改質，レーザ加工

キーワード：微細ダイヤモンド工具 大気圧プラズマ 高純度SiC 表面改質 クーラント

1. 研究開始当初の背景

近年、生化学分野に用いるバイオ分析チップや有機合成マイクロリアクタをはじめ、マイクロマシン用軸受け、ミサイル搭載用共振ジャイロ、レーザープラズマ加速器用混合流路など、サブミリサイズの三次元微細構造物をターゲットとしたマイクロ加工のニーズが益々高まっている。それに伴い、小径で高精度な微細ダイヤモンド工具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、セラミックス (SiC, Si₃N₄, ZrO₂ 等), サファイアなどであり、ほとんどが超精密かつ高効率加工が難しい硬脆材料である。

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粒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。すなわち、ミクロの視点より PCD 工具による硬脆材料の加工メカニズムを考察すると、超精密研削におけるダイヤモンド砥粒の挙動と同様に、砥粒の物理的損耗、化学的消滅、脱粒などが複雑に絡み合う加工モデルであろうと推察される。今後も PCD マイクロ工具を用いた自由度の高い微細加工技術を確立するためには、工具最表面のダイヤモンド粒突出をいかに均一・最適に制御し、切削能力を維持するかがカギであり、さらに加工点の瞬時冷却・ナノサイズ切り屑の排出性能の最大化をもたらすクーラント環境を制御できる新たなアシスト技術が必要となる。

本研究は、新しい表面機能制御法として注目されている“大気圧低温プラズマジェット”を援用し、加工中のクーラント効果を最大化させるという斬新な試みである。

2. 研究の目的

研究代表者は、これまで一貫して超精密微細加工/表面機能創発に関わる研究に取り組んできた。最近では、微粒ダイヤモンドからなるハイグレードな PCD マイクロ工具を用いて、超硬合金や CVD-SiC といった高付加価値材料に対し、研磨レスで粗さが 10 nm Rz 以下の高品位微細形状加工を達成している。得られた成果は、学术界のみならず産業界からも注目を集めている。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であることをいち早く指摘している。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。この工具付着物の問題は、最先端工具のパフォーマンスを最大限に引き出し、効率的に使用するためには解決すべき喫緊の課題であった。応募者らは、この課題に対し、電解作用を援用した独自の工具リコンディショニング (再生) 技術を開発し、特許申請も行っている (特願 2013-237840)。今後も幅広い被加工材質かつ先端工具を見据え、超精密加工技術の達成精度レベルの更なる漸進のためには、加工点の瞬時冷却・ナノサイズ切り屑の排出性能の最大化をもたらすクーラント環境を制御することが極めて重要であるという認識に至っている。

本研究は、新しい表面機能制御法として注目されている“大気圧低温プラズマジェット”を超精密機械加工のクーラント援用技術に導入するという斬新な試みである。大気圧低温プラズマとは、大気圧下にてパルス放電を行うことで電子のみが高温 (数万 K) となり、イオンおよび中性粒子は低湿のままであることが特徴である。電子温度が高いため化学反応性が高く、材料表面の有機汚れ除去や医療器具の滅菌、種々の材料の表面親水化・疏水化への応用が研究されている。プラズマジェットを加工点にピンポイントで照射することにより、加工中のクーラント効果を促進させ、微細ダイヤモンド工具の加工性能を最大化させることを目的としている。

3. 研究の方法

研究期間を通して、被削材としては SiC 純度が 99.9995% 以上の CVD-SiC を用いた。工具は半径 0.5 mm の PCD ボールエンドミルを使用した。また、工具を送り方向に対して垂直に使用すると、工具最下点付近の加工速度が小さくなるため、送り方向に対して工具を 45° 傾けて使用した。加工機はリニアモータ駆動の超精密加工機を使用した。加工実験条件およびプラズマ照射条件を表 1 に示す。加工点にプラズマを照射している様子を図 1 に示す。なお、実験には新規導入した高出力プラズマ発生装置 (最大出力 170W) を使用した。各加工後、それぞれの加工面について白色干渉顕微鏡による粗さ測定を行った。また加工面、及び工具を SEM によって観察した。

表 1 実験条件

Tool rotation speed, rpm	50,000
Tool feed speed, mm/min	10
Cutting depth, μm	0.5 / 0.2
Total depth of cut, μm	25
Tool tilt, deg	45
Plasma gas	Nitrogen
Gas flow, l/min	20

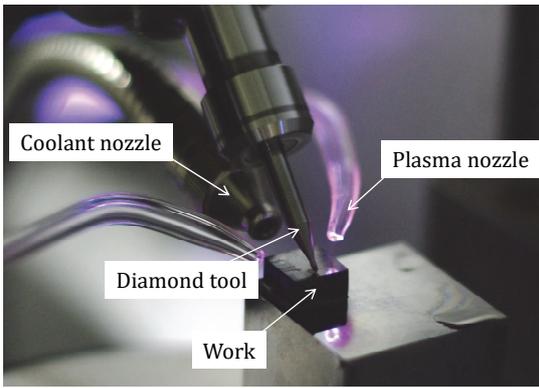


図1 大気圧プラズマ援用クーラントの実験概観

4. 研究成果

図2にプラズマ援用の有無による加工面性状の比較を示す。プラズマを援用しない加工の Ra は 3.9 nm であったが、プラズマを援用した加工の Ra は 1.7 nm であり、プラズマ照射によって表面粗さの低減ができることを確認している。プラズマ援用時の加工面にはミーリング加工時に発生した切削痕が確認できる。これは延性モード加工が作用していることを示すものであり、適切に加工が進行したことがわかる。

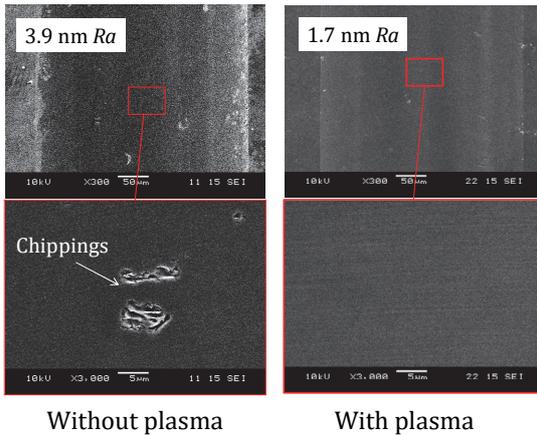


図2 プラズマ援用有無による加工面性状

さらに、加工前および加工後の工具の状態を確認したところ、プラズマジェットを援用することで、付着物の抑止に甚大な効果があることが確認できた(図3)。図4はプラズマ援用あり・なしの条件下で長距離加工(3000 mm)を行った際の被加工物表面粗さ Rz の評価結果である。加工距離が延びるに従ってプラズマ援用なしの場合は脆性破壊面の発生により加工面粗さは劣化するが、プラズマを援用した場合は加工距離 3000 mm まで高品位性状を維持できている。よって、工具寿命改善・加工能率の向上が見込まれる。プラズマ援用クーラントの効果発現要素とは、①被加工物表面の親水性向上による“工具⇄被加工物間極界面”のクーラント性能を向上させる現象、②工具表面のプラズマ処理

により溶着性の高い酸化物でさえ付き難くする現象、③プラズマ状態の活性種の高反応性によって、切り屑の酸化を抑制し、他の生成物チップとして排出される現象、これらの現象が重畳的に作用すると考えられる。

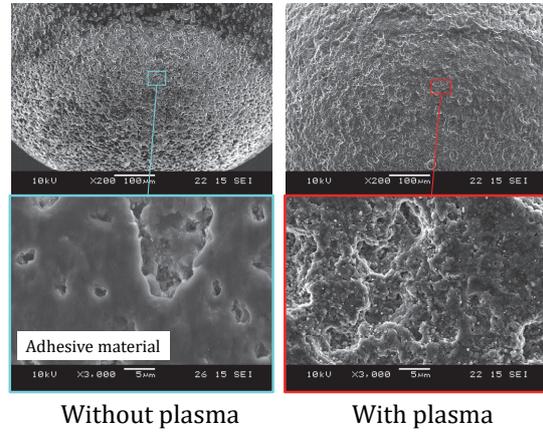


図3 プラズマ援用あり・なしで加工した後のPCDボールエンドミルの様子

F: 10 mm/min
Ad: 0.5 μ m
Cutting length: 3000 mm

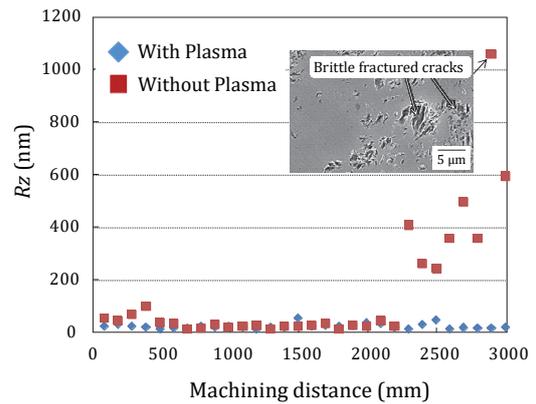


図4 長距離加工時におけるプラズマ援用クーラントの効果

さらに、同様の条件下でサファイアに対して PCD 工具を用いたミーリング加工を行い、加工条件および加工距離の増加が加工面性状に及ぼす影響について検討するとともに、プラズマ援用クーラントの効果検証を行った。なお、本実験には導入したプラズマ発生装置(誘電体バリア放電方式)を使用した。プラズマ援用クーラントを用いて PCD 微細ミーリング加工を行ったサファイアの加工面を観察した結果、平均表面粗さで 5 nm 以下という極めて高品位な表面が得られることが確認できた(図5)。誘電体バリア放電方式のプラズマ発生装置により高品位なプラズマを長時間安定して照射可能となったこと、独自に設計製作したプラズマガス供給装置により発生したプラズマの迅速評価が可能となったことが目標達成のカギとなった。

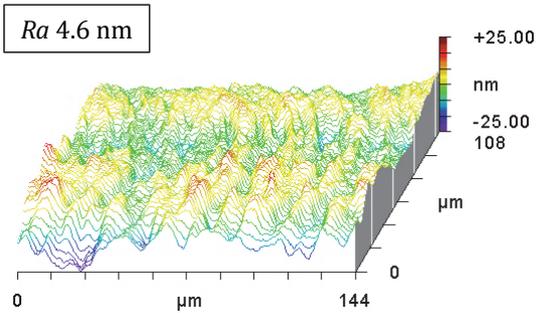


図5 プラズマ援用クーラントを用いてファイアのPCDミーリング加工を行った結果

本研究成果の応用展開として、バインダレスナノ多結晶ダイヤモンド (BL-PCD) エンドミルを用いた炭化ケイ素 (SiC) ミーリング加工を行い、加工条件変化 (切り込み深さ、送り速度) および加工距離の増加が加工面性状に及ぼす影響についても検討するとともに、プラズマ援用クーラントの効果検証を行った。なお、実験には導入した高周波プラズマ発生装置 (グライディングアーク放電方式) を使用した。その結果、プラズマ援用クーラントを用いることで、BL-PCD 工具を用いた場合においても、SiC 加工面の脆性破壊の発生を大幅に抑制でき、かつ加工面粗さも Ra で 3 nm 以下という極めて高品位な加工性能を発揮することが確認できた。図6に示すように、プラズマ援用クーラントを用いることで工具表面の付着物を大幅に抑制できたことが要因であると考えられる。3年間の系統的な研究を通じて、大気圧プラズマ援用クーラントは、多彩な微細ダイヤモンド工具に適用可能であり、セラミックス等に対してナノレベル高品位加工面が得られることを実証することができた。

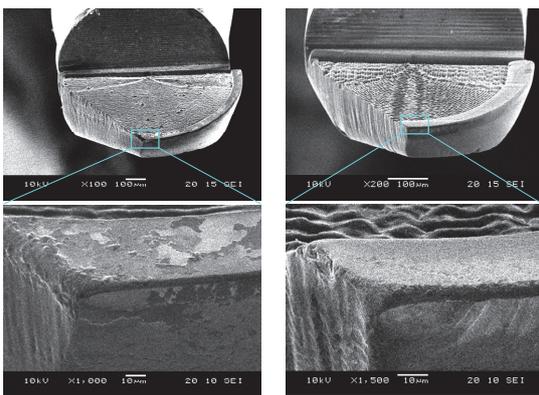


図6 プラズマ援用クーラントあり・なしでSiCを加工した後のBL-PCD工具の様子

一方、加工のフロント (工具と被加工物のナノ領域接触点) において、プラズマガスがどのように作用し工具の切れ味を維持しているのか、その機能発現メカニズムについては未だ解明できていない。また、本手法の新規アプリケーションの拡充に向けた専用シ

ステム開発の取り組みまでは至っていない。今後は、プラズマ化された活性種と、加工フロントにおける被加工物/工具/チップとの化学反応をより精緻に制御するとともに、加工面/工具面の詳細な化学分析を通じて、プラズマの機能発現メカニズムを解明するため、引き続き鋭意研究を継続する必要がある。

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2件)

1. Kazutoshi Katahira, Yuhei Matsumoto, Jun Komotori, Kazuo Yamazaki, Experimental investigation of machinability and surface quality of sapphire machined with polycrystalline diamond micro-milling tool, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, Volume 93, Issue 9-12, pp 4389-4398, 査読有
2. Katahira, K., Ohmori, H., Takesue, S., Komotori, J., Yamazaki, K., Effect of atmospheric-pressure plasma jet on polycrystalline diamond micro-milling of silicon carbide, *Annals of the CIRP*, Volume 64, Issue 1, 2015, Pages 129-132, 査読有

[学会発表] (計10件)

1. 片平和俊, 微細ダイヤモンド工具の加工性能最大化のためのマルチアシスト技術の開発, 精密工学会 2017年度学術講演会秋季大会, 2017年9月, 大阪府・豊中市
2. 天野慎一郎, 片平和俊, 亀山雄高, 大気圧プラズマ援用クーラントシステムの開発 (PCD ボールエンドミルによる SiC の高品位加工への適用), 精密工学会 2017年度学術講演会春季大会, 2017年3月, 神奈川県・港北区
3. Kazutoshi Katahira, Nano-precision milling on single crystalline sapphire utilizing PCD micro tool, *ChinaNano2017*, Sep. 2017, China・Beijing
4. Kazutoshi Katahira, Kazuo Yamazaki, Hitoshi Ohmori, Micromilling Characteristics and Electrochemically Assisted Reconditioning of Polycrystalline Diamond Tool Surfaces for Ultra-Precision Machining of Sapphire, *Machine Tool Research Foundation (MTRF) 2016*, San Francisco, USA, July 2016
5. 松本悠平, 片平和俊, 渡邊健志, 大森整, 小茂鳥潤, PCD ラジアスエンドミル

- によるサファイアの加工特性, 2016 年度精密工学会春季大会学術講演会 (精密工学会), 東京理科大学野田キャンパス, 千葉, 2016 年 3 月
6. 片平和俊, 大気圧低温プラズマを援用した加工と改質, 精密加工研究会, 仙台, 2016 年 12 月
 7. Katahira, K., Ohmori, H., Takesue, S., Komotori, J., Yamazaki, K., Effect of atmospheric-pressure plasma jet on polycrystalline diamond micro-milling of silicon carbide, *CIRP General Assembly 2015*, Cape town, South Africa, August 2015
 8. Kazutoshi Katahira, Kazuo Yamazaki, Kazuo Nakamoto, Hitoshi Ohmori, Characteristics of precision diamond milling processes applied for advanced micro components, *Machine Tool Research Foundation (MTTRF) 2015*, San Francisco, USA, July 2015
 9. 片平和俊, 武末翔吾, 渡邊健志, 大森整, 小茂鳥潤, 大気圧プラズマ援用クーラントシステムの開発 (SiC の PCD マイクロミリングにおけるプラズマ援用クーラントの効果), 精密工学会学術講演会講演論文集 2015 年度精密工学会春季大会, 東京, 2015 年 3 月
 10. 松本悠平, 片平和俊, 武末翔吾, 渡邊健志, 大森整, 小茂鳥潤, PCD 微細エンドミルによるサファイアの加工特性と電解援用リコンディショニング, 精密工学会学術講演会講演論文集 2015 年度精密工学会春季大会, 東京, 2015 年 3 月

〔図書〕 (計 1 件)

1. 片平和俊, 微細ダイヤモンド工具による超精密切削加工, *機械の研究*, Vol. 68 No. 1, 32-36

6. 研究組織

(1) 研究代表者

片平 和俊 (KATAHIRA, Kazutoshi)

国立研究開発法人理化学研究所・大森素形
材工学研究室・専任研究員

研究者番号：7 0 3 3 2 2 5 2

(2) 研究分担者

小茂鳥 潤 (KOMOTORI, Jun)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：3 0 2 2 5 5 8 6