

学位論文 博士（工学）

ナノ多結晶ダイヤモンド工具の
フェムト秒パルスレーザー加工による高能率成形

2019年度

慶應義塾大学大学院理工学研究科

小河誉典

目次

第1章 緒論	4
1-1 序言	4
1-2 研究の背景	4
1-2-1 マイクロ加工の変遷と現在要求される性能	4
1-2-2 マイクロ工具の役割	4
1-2-3 ダイヤモンド工具について	5
1-2-4 ナノ多結晶ダイヤモンドについて	7
1-2-5 レーザ加工	8
1-2-6 フェムト秒パルスレーザー加工について	8
1-3 本研究の目的	10
1-4 本論文の構成	10
第2章 各種ダイヤモンド工具の超硬合金加工性能の評価	11
2-1 序言	11
2-2 実験方法	11
2-2-1 各種ダイヤモンド工具の仕様	11
2-2-2 被加工物と加工機の特徴	13
2-3 各種ダイヤモンド工具による超硬合金加工実験	15
2-3-1 工具摩耗の評価	15
2-3-2 切削抵抗の評価	18
2-3-3 超硬合金の加工面性状の評価	19
2-3-4 NPD 工具の逃げ面粗さの影響	21
2-3-5 高負荷加工条件での加工	23
2-3-6 NPD 工具の寿命評価	26

2-4	結言.....	27
第3章	パルスレーザによるダイヤモンドの基礎加工特性.....	28
3-1	序言.....	28
3-2	実験方法.....	29
3-2-1	レーザ加工機の仕様.....	29
3-2-2	加工形状・加工方法.....	32
3-2-3	加工面の評価方法.....	33
3-3	実験結果.....	33
3-3-1	レーザ走査速度の加工面への影響.....	33
3-3-2	加工効率・面粗さのレーザ出力依存性.....	35
3-3-3	ナノ・フェムト秒パルスレーザによる平行レーザ加工.....	40
3-3-4	フェムト秒パルスレーザ加工面の波長・偏波方向依存性.....	44
3-3-5	平行レーザ加工面の形状評価.....	45
3-4	結言.....	46
第4章	フェムト秒パルスレーザ搭載5軸加工システムの開発.....	48
4-1	序言.....	48
4-2	加工システムの構成.....	49
4-2-1	レーザ発振器・光学系.....	49
4-2-2	5軸加工システムの機械的な構成.....	52
4-2-3	ガルバノスキャナ.....	55
4-2-4	フェムト秒パルスレーザ搭載5軸システムの構築.....	57
4-3	フェムト秒パルスレーザ加工システムの評価.....	59
4-3-1	5軸加工機の精度評価.....	59
4-3-2	レーザビーム特性の評価.....	63
4-4	結言.....	65

第5章 フェムト秒パルスレーザーによる NPD 工具の成形	66
5-1 序言.....	66
5-2 実験方法.....	66
5-2-1 加工条件.....	66
5-2-2 工具の各加工プロセス最適化	68
5-3 NPD 工具のフェムト秒パルスレーザーによる成形.....	74
5-4 フェムト秒パルスレーザーにより成形した NPD 工具の評価.....	76
5-4-1 形状評価.....	76
5-4-2 加工性能評価.....	80
5-5 結言.....	83
第6章 結論	84
謝辞	86
参考文献	87
関連文献	94

第1章 緒論

1-1 序言

次世代のものづくり技術として3Dプリンタが注目されており、付加製造(Additive Manufacturing, AM)技術として活発な研究がなされている¹⁾。AMは、これまでの加工方法では不可能であった複雑な構造や、成形する部品に最適な冷却配管を持つ金型を製作できることから、金型製造の分野でも実用化がすすめられている²⁾。金属を積層する方式としては、金属粉末とレーザを同時に照射し、積層と溶融を行うダイレクトエナジーデポジション(DED)方式や、金属粉末を敷き詰め、熱源となるレーザで造形箇所を部分的に溶融・凝固させ積層していく方式であるパウダーベッド方式が代表的であるが^{3), 4)}、どちらも熱を利用した造形方式であるため、素材の熱変形による造形精度や品質の低下が問題とされ、多くの場合は後処理加工が必要となる。後処理加工の方法には切削加工を用いることが多く、未だに切削加工は次世代のものづくりにおいても非常に重要な基盤技術の一つであると考えられる⁵⁾。切削技術は、これまでは新規素材の加工技術や、多軸加工機、複合加工機を用いた複雑形状の加工技術、また、精密形状を要する部品の製作などの用途で超精密加工技術が発展してきたが、近年では、エネルギーを大量消費することによるデメリットや資源の限界が見え始めたこともあり、切削加工においても低コスト化や、リードタイムの向上などの高能率切削技術への注目が集まっている^{6), 7)}。本章では、高能率な切削加工を実現するための高性能ナノ多結晶ダイヤモンド工具を、レーザ加工によって成形する方法についての研究の背景を述べる。

1-2 研究の背景

1-2-1 マイクロ加工の変遷と現在要求される性能

金属材料を用いた微細部品の成形加工は精密機械時計などの産業界で古くから行われていたが、1990年代、MEMSセンサ、アクチュエータや電見デバイスの小型化に伴い、ナノ・マイクロオーダーの金属材料成形加工が再び注目されるようになり、多くの研究が報告された⁸⁾。多結晶金属材料がダウンサイジングに伴う材料変特性や潤滑特性の変化、いわゆる成形加工の寸法効果に関する研究報告が大半を占めたが、被加工材のマイクロ化に伴って、被表面積が増大し、表面層の変形および工具との摩擦の影響が相対的に大きくなることや、素材寸法あるいは加工寸法が多結晶金属材料の結晶粒径に近付くことで、変形の不均一化、成形限界の定価などの素材変形特性に関する課題が分かってきた。さらに加工寸法に対する加工プロセスの精度や金型精度なども課題であった^{9), 10)}。

1-2-2 マイクロ工具の役割

電子機器や機能部品の高性能化や小型化にともない、微細な部品を大量に生産することが要求されており¹¹⁾、そのような部品を生産する金型には微細形状を持ちつつも耐久性が高いことが求められる。これらの要求にこたえるために、金型材料としてはガラスやセラミックス、超合金などの高能率硬脆材料が使用されることが多いが、微細形状を持つ硬脆性材料金型を高精度に加工する

ためには、直径寸法 1 mm 以下かつサブミクロンレベルの形状精度を有する回転工具(マイクロ工具)が必要不可欠となる。マイクロ工具に求められる特性として、高い硬度と優れた耐摩耗性を有し、長時間使用できることが要求されるが、そのような工具の素材として、とくに非鉄系金型素材の難削材を精緻かつ高能率に加工する用途にはダイヤモンドが用いられている^{12),13)}。

1-2-3 ダイヤモンド工具について

前述の通り、非鉄系の硬脆性材料を加工するための工具としては、硬度の高さと優れた耐摩耗性からダイヤモンド工具が使用されることが多い。微細かつ複雑な 3 次元形状の形成には回転工具を用いた加工が適しており、ダイヤモンド製のマイクロ回転工具を用いることが理想的である。工具に用いられるダイヤモンド素材として、これまでは単結晶ダイヤモンド(Single Crystalline Diamond: SCD)や¹⁴⁾、ダイヤモンド粒子をコバルトやニッケルなどのバインダ材と共に焼結することで作製される多結晶ダイヤモンド(Polycrystalline Diamond: PCD)が使用されてきた¹⁵⁾。

SCD の結晶構造の基本となる単位格子を図 1-1^{16),17)}、代表的な結晶方位の模式図を図 1-2^{16),17)}、表 1-1 に SCD の各結晶面のへき開エネルギー¹⁸⁾を示す。SCD は、1 つの炭素原子(図 1-1 中の灰色丸に対応)を中心とした正四面体の頂点に最近接の炭素原子(図 1-1 中の白丸に対応)が位置し、3 次的に炭素原子の規則正しい配列をした共有結合が広がった構造(ダイヤモンド構造)を持つ結晶である。SCD の単位格子は 3 本の等しい長さの稜を持ち 3 つの軸角がすべて 90°である立方晶系に属する。表 1-1 にも示す通り、SCD は結晶方位によりへき開のしやすさや機械的強度が異なり、特に(111)面に平行な方向にへき開が起きやすい。そのため、加工中に切削負荷方向が変化する回転工具に SCD を用いる場合は、加工条件を十分に考慮する必要がある¹⁹⁾。

PCD は機械的強度の異方性やへき開性がなく、また、焼結体として含まれるコバルトなどに導電性があるために、PCD も導電性を持ち、放電加工が適用できることから、工具形状への成形も比較的容易である^{20)~22)}。SCD と比較してコスト的にも有利なことから、これまでもマイクロエンドミルにも使用されている。しかしながら、PCD は、ダイヤモンド粒子をコバルトなどのバインダ材により保持する組織であるため、加工中に粒子の脱落による摩耗が生じ工具寿命が短い、またバインダ材の影響により、600~700°Cではダイヤモンドの構造体とバインダ材の熱膨張差によってマイクロクラックが導入され熱に弱いという問題がある²³⁾。

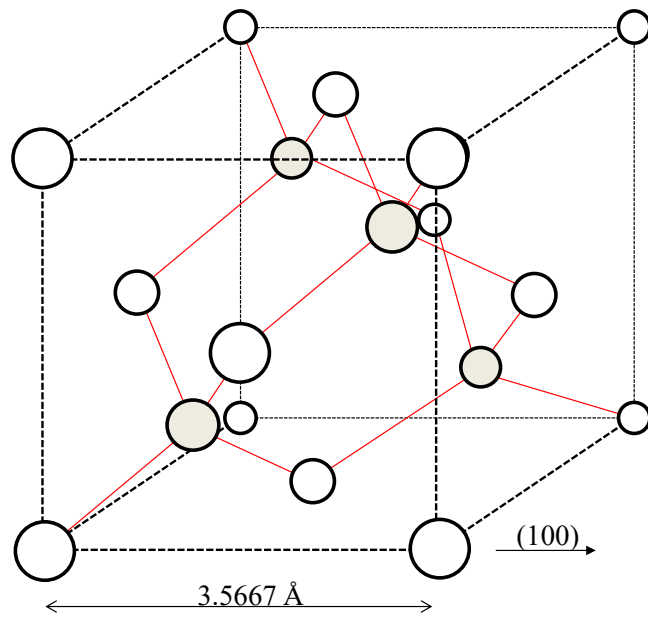


図 1-1 単結晶ダイヤモンドの結晶構造^{16),17)}

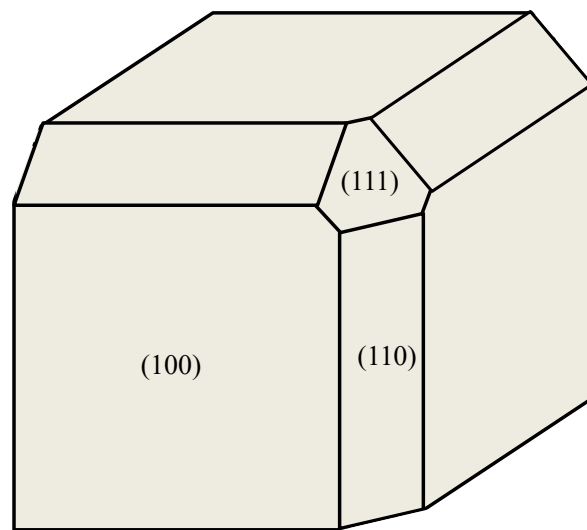


図 1-2 ダイヤモンドの結晶方位^{16),17)}

表 1-1 単結晶ダイヤモンドの各結晶面のへき開エネルギー¹⁸⁾

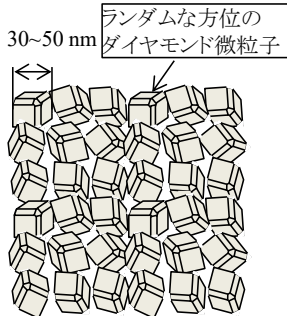
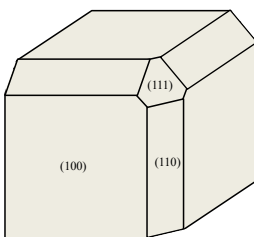
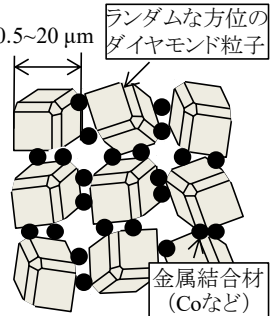
結晶面	(111)	(110)	(100)
へき開エネルギー mJ/cm^2	1.133	1.388	1.963

1-2-4 ナノ多結晶ダイヤモンドについて

ナノ多結晶ダイヤモンド (Nano-Polycrystalline Diamond: NPD) は、微細ダイヤモンド工具素材として注目を集めている材料であり、高純度グラファイト粉末に、超高圧・高温を与えることで、ダイヤモンドに直接変換した素材である^{24)~26)}。15 GPa, 2300 °C以上でグラファイトは立方晶ダイヤモンドに完全に変換され、変換と同時に焼結が起こるため、ダイヤモンド単相の強固な平均粒径 30~50 nmの微粒子からなる多結晶体が得られる。グラファイトを出発物質として焼結されたNPDは、微細なダイヤモンド粒子からなる均質構造と層状ダイヤモンドからなるラメラ構造の混在した組織となり、ラメラ構造がクラックの進展を阻止するために硬度、破壊靱性が向上することが報告されている^{27)~29)}。

表 1-2 に NPD, SCD, PCD の物性を示す³⁰⁾。NPD は、機械的強度の異方性やへき開性がなく、化学的にも安定であり、SCD を凌駕する硬度や諸特性を有することから、硬脆材料に対する高能率切削工具として期待されている。すでに超硬合金に対して基礎加工実験を行ったこと例もあり、工業的にも一定の成果が報告されている^{31)~33)}、しかしながら上述したように、NPD には機械的強度の異方性が無いため、SCDのように加工容易方向を利用した加工ができず、またPCDと異なり、導電性のバインダ材を含まないため、NPD は導電性を持たず、NPD に放電加工を適用することはできない。現状では工具形状に成形するために、研磨を用いているが、製作に時間を要し、工具単価が割高になってしまうという課題がある。この課題を解決するために、NPD を所望の形状に高能率、かつ高精度に成形する方法の確立が求められており、レーザを用いた加工方法などが検討されている^{34)~36)}。

表 1-2 各種ダイヤモンドの物性³⁰⁾

材質名	NPD	SCD	PCD
組織イメージ	 <p>30~50 nm ランダムな方位の ダイヤモンド微粒子</p>		 <p>0.5~20 μm ランダムな方位の ダイヤモンド粒子 金属結合材 (Coなど)</p>
ヌープ硬度	120-130 GPa	80-120 GPa	50 GPa
など方性	等方的	方位依存性大	等方的
強度・耐欠損性		(111)方向に へき開し易い	
粒子サイズ	30-50 nm	-	0.5~20 μm
電気伝導性	無し	無し	有り

1-2-5 レーザ加工

レーザー加工は、収束されたレーザービームを加工対象に照射することで、対象を熔融、蒸発、もしくは昇華することで除去する加工方法であり、1970年代に入ってから実用化された比較的新しい技術である³⁷⁾⁻⁴⁰⁾。レーザーの集光により非常に高密度なエネルギーが得られるため、加工対象の硬度によらず、ほとんどの材料を加工することが出来るという特徴がある。その他の利点として、レーザー光は指向性と集光性に優れており、照射部分のみ選択的に加工することができ、微細な加工に適している、レーザー光の集光径や出力、周波数、波長などの加工条件を比較的自由に設定できる、従来の工具を使う加工とは異なり非接触加工であるため、接触加工時に生じる工具の圧力による歪みやクラックが発生するリスクを抑えられ、薄板などの変形しやすい材料との相性が良い、加工時に切削加工のような粉塵が発生せず、メンテナンス性が良好である、また、レーザーには工具のような物理的な損傷(摩耗、チッピングなど)が無いため、工具交換などによるランニングコストが抑えられるという点が挙げられる。

デメリットとしては、レーザーは実体の工具の損傷などが目視で確認できるのとは異なり、経年劣化などの要因でのレーザービームの形状、パワーなどの変動が確認し難く、設定上は同様の加工条件としても実際の条件とは異なり、加工結果に影響を及ぼす可能性があり、レーザーの状態を常に確認しておく必要がある点、また、実体の工具での加工では、工具が接触した箇所以外は基本的に加工されることが無いが、レーザー加工では、ビームが空間的にエネルギー分布の拡がりを持っており、加工が可能となる焦点も、光学系によるが、ある程度の長さを持つため、想定した箇所以外が加工されることも考えられる。

レーザー加工に用いられるレーザーは、年々高出力化が進んでおり、高出力な炭酸ガスレーザーやファイバレーザーでは、数10 kWの出力のものが市販されている。ここ十数年で、レーザーの安定化と高出力化が達成されたため、短波長・短パルスレーザーによるマイクロオーダーのスケールを下回る微細加工が可能となってきた。

1-2-6 フェムト秒パルスレーザー加工について

フェムト秒パルスレーザーは、フェムト秒単位のパルス幅($10^{-15} \sim 10^{-12}$ sec)を持つレーザーである。極短光パルス発生とその増幅に関する技術は1980年代後半から急速に発展しており、現在ではパルスピーク強度がテラ(10^{12})からペタ(10^{15}) Wの領域に到達している。また、テーブルトップサイズでも高強度フェムト秒パルスレーザーパルスが得られるようになったため、その特性を活かした研究、産業応用が様々な分野で進展しており、レーザー加工にも使用されるようになってきた⁴¹⁾⁻⁴⁴⁾。

フェムト秒パルスレーザー加工の特徴として、まずパルス幅が非常に短いことによる非熱的加工が可能であることが挙げられる。フェムト秒単位のパルス幅は、物質の電子格子緩和時間よりも短いために、電子系と格子系が熱平衡状態になる前に物質にエネルギーを注入できる。すなわち物質の温度が上昇する前に加工現象が進行するため、熱影響がほとんどない加工が実現できるとされ、微細加工に有力なツールとして利用されている^{45), 46)}。レーザーと物質の相互作用は、一般的にピコ秒の時間スケールを境に、熱的、非熱的過程に区分される。この境目となる時間は、自由電子から

格子イオンでの衝突緩和時間により決まるため、レーザを照射する対象となる物質や、温度によって異なる。衝突緩和時間は電子・フォノン間のカップリングパラメータより計算され、金属の場合は、数ピコ秒程度と報告されている⁴⁷⁾。熱衝突緩和時間よりも長いパルス幅のレーザが物質に照射されると、電子と格子イオンは平衡状態にあり、同じ温度経過を示すため、熱的過程になる。一方、熱衝突時間より短いパルス幅のレーザが照射された場合、電子温度が格子イオン温度よりも高い非平衡状態を経て、レーザ照射が終わった後に格子イオンの加熱が始まる非熱的な過程となる。単純に、熱伝導が1次元のみで起こると仮定すると、熱拡散長 χ は、次式(1)で表される。

$$\chi = 2\sqrt{Dt_p} \quad (1)$$

ここで、 D は熱拡散係数、 t_p は加熱時間を示す。たとえば金属の場合、 t_p を1 nsとすると熱拡散長は1 μm 程度、100 fsとすると10 nm程度となり、熱拡散長が短いことが分かる。上述したようなナノ秒パルスレーザのような長パルスのレーザでの加工と、フェムト秒パルスレーザのような短パルスレーザでの加工の特徴を比較すると図1-3のようになる。

フェムト秒パルスレーザ加工のもう一つの特徴として、非常に高いパルスピーク強度による多光子吸収の効果がある。レーザ光の強度が高くなると、通常は吸収が起こらない波長であっても、同時に2個以上の光子が吸収される現象である多光子吸収が起こる⁴⁷⁾。 n 光子過程が起こる確率は光強度の n 乗に比例するため、多光子吸収を起こすには、フェムト秒パルスレーザのような高パルスピーク強度を持つレーザを照射することが有効である。多光子吸収の効果により、透明体の安定的な加工や、透明体の内部に焦点を合わせた内部のみの加工、またピーク強度の高いレーザ中心のみが多光子吸収が起きるよう強度を設定することで、ビーム径以下の寸法の加工などが実現できる^{41)~48)}。

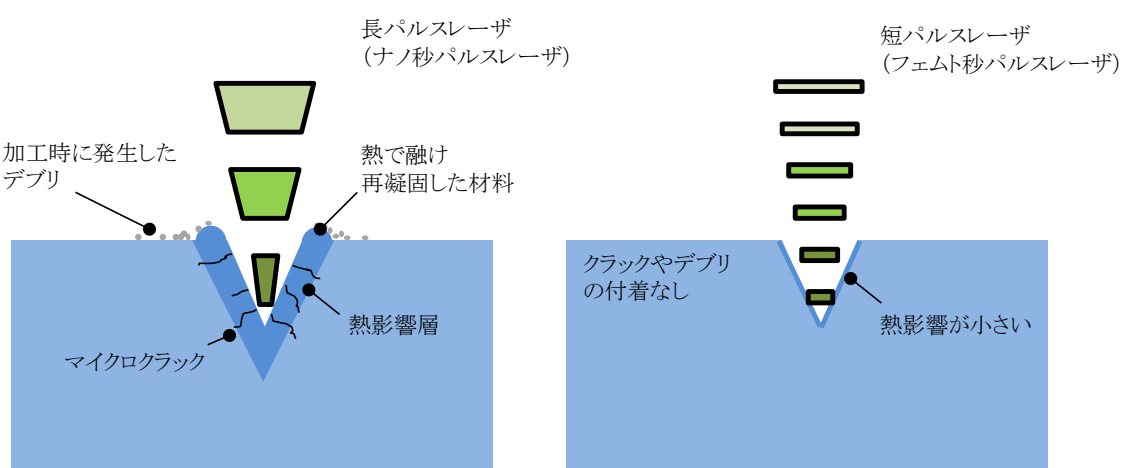


図 1-3 長パルスレーザと短パルスレーザ加工の比較イメージ

1-3 本研究の目的

前述の通り、近年の電子部品の小型化などの需要から精密加工技術が必須となる。そのような小型部品や、小型部品を製作するための微小な形状を持つ金型を高精度に製作するためには、小径、高精度かつ耐摩耗性が高い工具が求められる。そのような工具材料としてダイヤモンド、特に単結晶よりも高い硬度を持ち、さらに異方性を持たない NPD が適していると考えられる。しかし NPD はその高硬度、絶縁性から従来の方法での加工が困難であり、現状では研磨を用いて工具形状に成形しているものの、工具製作には時間を要し工具単価が割高であるため、普及が進んでいないという課題がある。そこで本研究では NPD 工具を高効率かつ高精度に製作する方法を開発することを目的とした。

具体的な研究のアプローチとしては、まず、NPD 工具と他のダイヤモンド工具を超合金の加工特性を比較することで NPD の工具素材としての優位性を確認した。その後、NPD 工具の高効率・高精度な加工方法の確立のため、NPD に対するパルスレーザ加工をトライした。フェムト秒パルスレーザが NPD 加工に対し有効であることが明らかになったため、工具作製に必要となる要件を満たした 5 軸加工機の開発を行い、最終的には開発した加工機を用いて NPD 工具の成形方法を検討した。

1-4 本論文の構成

本論文は本章を含む 6 章から構成される。

第 1 章では本研究の背景と目的について概説した。

第 2 章では NPD 工具と他種のダイヤモンド工具の超合金に対する切削性能の評価について述べた。

第 3 章では、NPD を高効率で加工する方法を確立することを目的とした、パルスレーザによる NPD の基礎加工実験について述べた。

第 4 章では、第 3 章で求めた NPD 工具を製作するために必要となる要件を盛り込んだ、5 軸のフェムト秒パルスレーザ搭載 NPD 工具製作システムの開発について述べた。

第 5 章では第 4 章で開発した加工装置を用いて、実際に NPD 工具を製作する方法について述べた。

第 6 章は結論であり、各章の内容をまとめ、本研究で得られた成果を要約した。

第2章 各種ダイヤモンド工具の超硬合金加工性能の評価

2-1 序言

本章では、概ね同形状の NPD, PCD, SCD 工具を用意し、統一した加工条件下にて、超硬合金を加工する際の各工具の摩耗挙動を詳細に分析するとともに、被削材の加工面粗さに関連付けることで各種ダイヤモンド工具の加工特性の差異を検証することを目的とする。また、NPD 工具に関してのみ、切れ刃エッジに研磨仕上げを行っていない未研磨の工具と、研磨仕上げを施した工具の 2 種類の工具を用いて同様の加工実験を行うことで、工具のエッジ部(とくに逃げ面)の仕上げ状態が被削材の加工面粗さなどに及ぼす影響について調査するとともに、NPD 工具の製作において必要となるエッジの面粗さを調査する目的も含まれる。

2-2 実験方法

2-2-1 各種ダイヤモンド工具の仕様

実験には、PCD 工具、SCD 工具および仕上げ方法が異なる 2 種の NPD 工具の計 4 種のダイヤモンド工具を用意した。各工具の形状は半径 0.5 mm の一枚刃ボールエンドミルで統一した。使用した 4 種の工具の刃先形状を表 2-1 に、外観およびエッジ部を拡大した様子を図 2-1 に示す。同図中、各工具の逃げ面粗さ測定結果も併記する。ダイヤモンド工具のような高硬度の工具はエッジが鋭利であるとチッピングが発生しやすいため、刃先強度の向上させる目的で 45°のチャンファを施した工具を用いた。またチャンファを施すことで、すくい角が負になり、切削面粗さ、切れ刃摩耗を低減する効果が期待できる⁴⁹⁾。SCD 工具は結晶方位の関係上、チャンファ長、逃げ角をその他の工具と同様に成形することが困難であったため、刃先形状が異なっている。SCD 工具の形状と結晶方位の関係を図 2-2 に示した。PCD 工具は住友電工ハードメタル社が本実験の為に製作した工具を使用した。工具の PCD 素材にはダイヤモンド粒径が 0.5 μm 以下の DA1000⁵⁰⁾を用いた。現状市販されている NPD 工具は粗加工後にエッジのすくい面、逃げ面、チャンファを研磨によって仕上げているが、本実験では、工具のエッジ部(とくに逃げ面)の仕上げ状態が被削材の加工面粗さなどに及ぼす影響について調査する目的で、研磨仕上げまで施した NPD 工具(NPD_Polish と称する)と、研磨仕上げを施していない NPD 工具(NPD_Unpolish と称する)の 2 種を使用した。なお、図 2-1(c)および(d)に示すとおり、NPD 工具においては、粗仕上げ後に研磨を施すことで逃げ面の表面粗さが 1/7 に低減されている。

表 2-1 各工具の刃先形状

	SCD	PCD	NPD Unpolish	NPD Polish
すくい角	-45°	-45°	-45°	-45°
逃げ角	15°	8°	8°	8°
チャンファ長	1 μm	12 μm	10 μm	9.1 μm

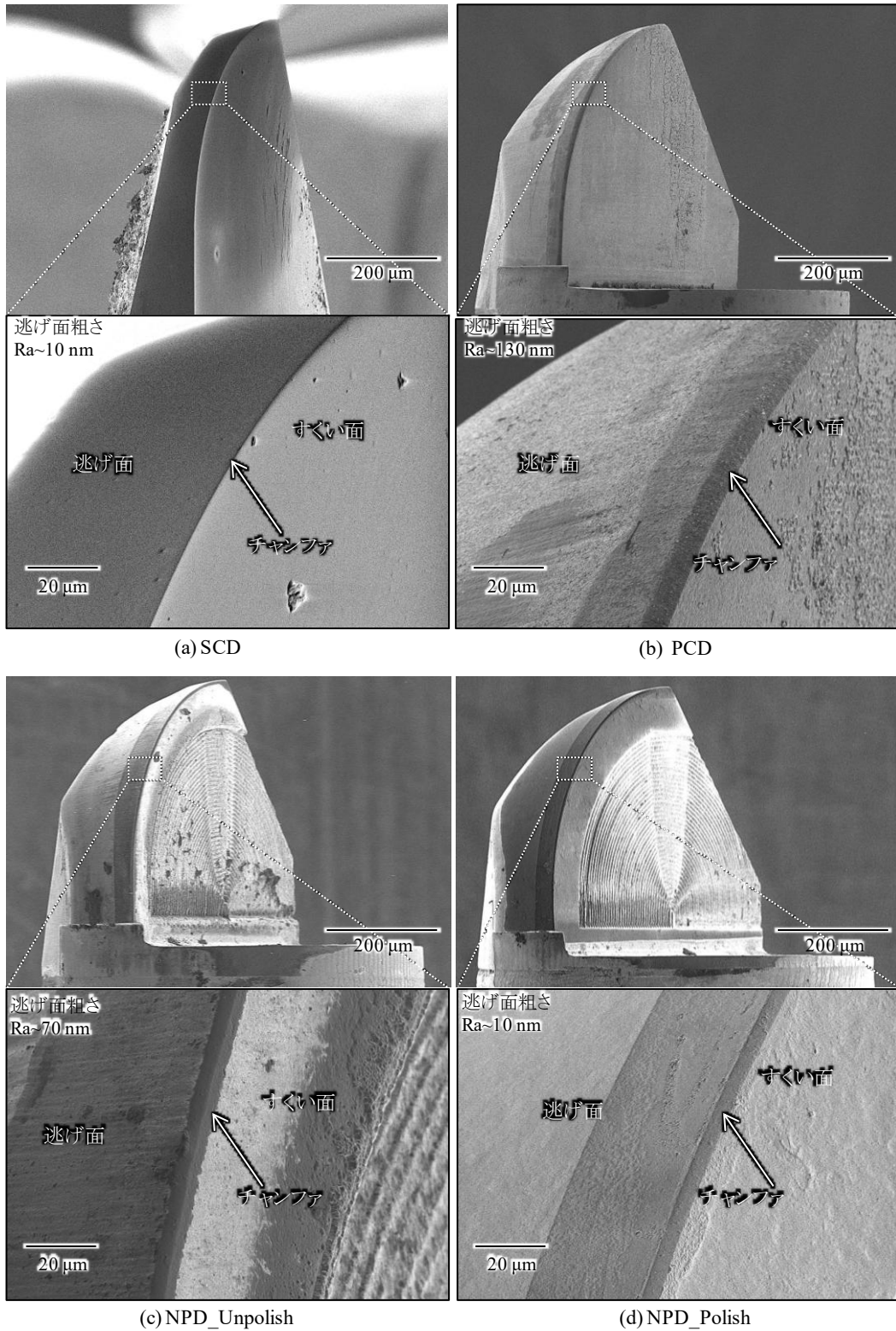


図 2-1 評価に使用した各種工具の外観の SEM 画像

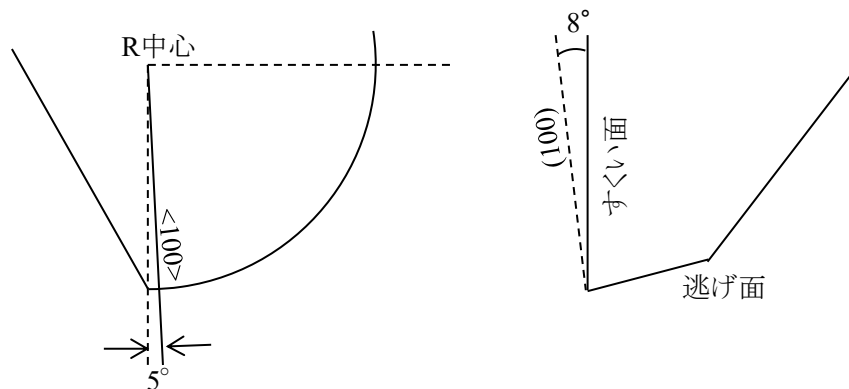


図 2-2 SCD 工具の形状と結晶方位の関係

2-2-2 被加工物と加工機の特性

被削材は、超微粒子超硬合金(住友電工ハードメタル社製, AF1)を使用した. AF1 の物性の詳細を表 2-2 に示す⁵¹⁾. 加工実験に使用した装置は, リニアモータ駆動の直進 3 軸(X-Y-Z 軸の最小位置決め分解能 10 nm)で構成された超精密加工機(ソディック社製, AZ150)である⁵²⁾. 本装置は, 回転数が $120,000 \text{ min}^{-1}$ のエアタービンスピンドル主軸を有している. AZ150 の仕様の詳細を表 2-3 に示す.

加工条件を表 2-4, 加工時のセットアップの様子を図 2-3 に示す. 同図に示すように, 加工機のテーブル上に 3 軸微小動力計(Kistler 製, 型式 9119AA2)を取り付け, その上に被削材をセットすることで, 段取り時に工具と加工物の接触感知を行うとともに, 加工中の切削抵抗を測定した. また, 工具形状がボールエンドミルであることから, 加工中に工具の下死点の切削速度がゼロになることを避けるため, 被削材の超硬合金をテーブルに対して 45° 傾けた状態でセットし, 加工実験を行った. この時, 被削材と接触する工具 45° 位置での切削速度は 267 m/min となる. 加工前後の工具の状態観察には走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope: SEM, ELIONIX 社製, ERA-8900FE), 被加工面の面粗さの測定には白色干渉計(ZYGO 社製, Newview7800), 工具の形状および面粗さ測定にはレーザオートフォーカス式非接触輪郭測定装置(三鷹光器社製, MLP-3SP)⁵³⁾を用いた.

表 2-2 超微粒子超硬合金(AF1)の物性値⁵¹⁾

粒径	0.5 μm
Co 含有量	12.0 wt%
抗折力	5.0 GPa
硬度 H^R_A	92.7
硬度 H_V	17.1 GPa

表 2-3 実験に用いた超精密加工機 (AZ150) の仕様

X 軸ストローク	150 mm
Y 軸ストローク	150 mm
Z 軸ストローク	100 mm
切削送り速度	5,000 mm/min
最小駆動単位	10 nm
加速度 X/Y/Z	2 G/1.5 G/ 2 G (加工時最大加速度:0.5 G)
最大ワーク重量	5 kg
主軸回転速度	120,000 min ⁻¹
主軸軸受け/駆動方式	エア静圧/エアタービン
工具シャンク径/長	φ4 mm/ 20 mm

表 2-4 加工条件

被削材	超微粒子超硬合金
工具回転数	120,000 min ⁻¹
クーラント	オイルミストブロー (非塩素油脂系不水溶性油)
工具法線方向切込み量	0.5 μm, 5 μm
テーブル送り速度 (一刃あたり切込み量)	600 mm/min (5 μm/rev)
ピックフィード量	5 μm
切削距離 L	500 m
工具傾斜角度	45°
切削速度	267 m/min

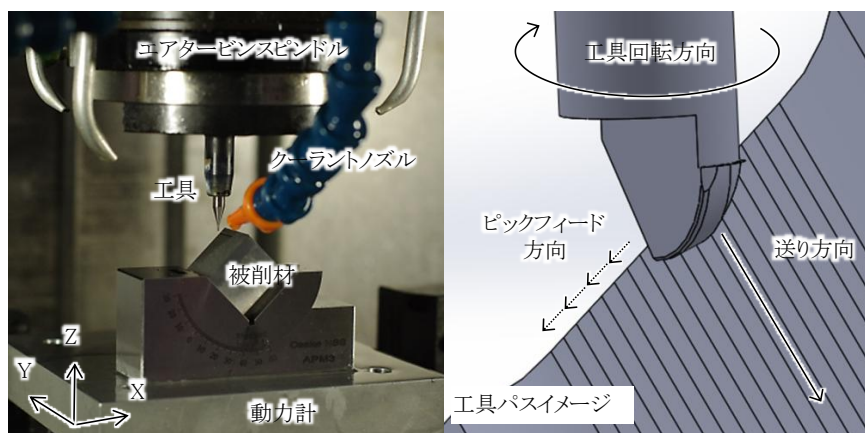


図 2-3 加工セットアップおよび工具パス

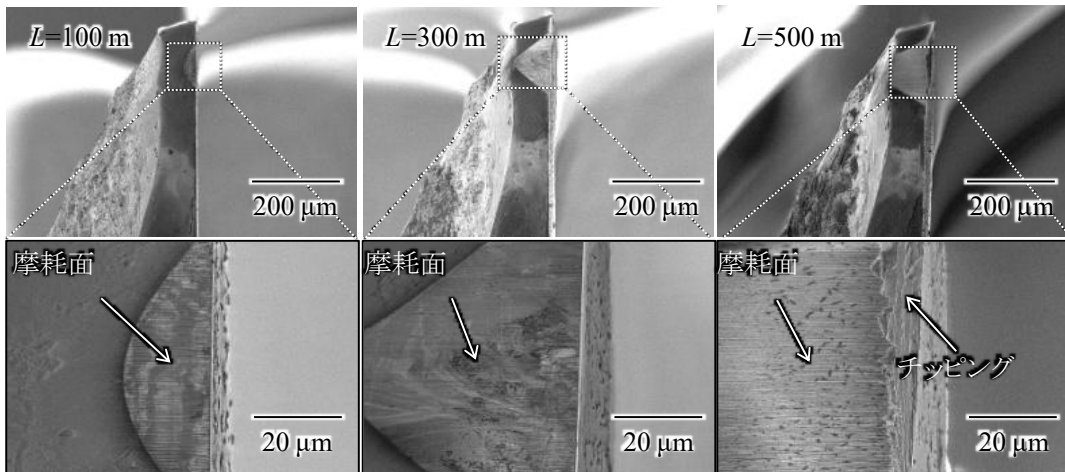
2-3 各種ダイヤモンド工具による超硬合金加工実験

2-3-1 工具摩耗の評価

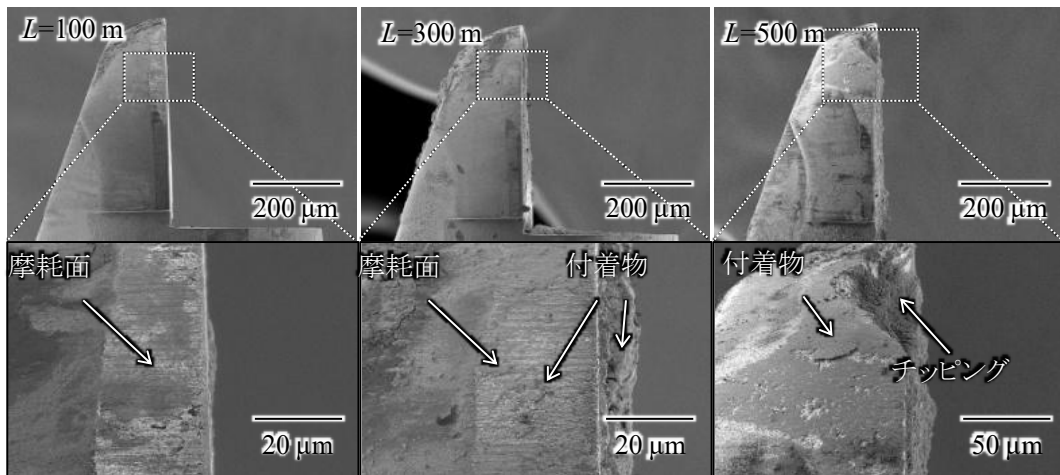
図 2-4 は、法線方向切込み量 $0.5 \mu\text{m}$ で加工を行った際の、各切削距離における各種ダイヤモンド工具の逃げ面摩耗の進行状態を観察した結果である。SCD 工具は逃げ角が 15° と他のダイヤモンド工具の 8° より大きい影響も含まれるが、摩耗の進行が早く、切削距離 300 m の時点で他の工具に比べ摩耗が著しく大きい。同工具は、切削距離が 500 m に達すると切刃エッジ部にチップングが認められた。チップングの原因として、SCD のへき開性や機械特性の異方性、加工時の摩擦熱による工具の温度上昇が SCD のすべり変形を誘起し易くし硬度が低下したことなどが考えられる^{54), 55)}。PCD 工具の摩耗の進行は、SCD 工具に比べ緩やかではあるものの、SCD 工具と同様に切削距離 500 m の時点で切刃エッジ部に大きなチップングが認められた。これは加工時の摩擦により刃先の温度が上昇し、PCD に含まれるダイヤモンド粒子とバインダ材の熱膨張差によって発生した微小クラックが、加工の機械的衝撃によって進展しチップングに至ったと推察される^{54), 55)}。また、工具の全面にわたって付着物が存在していた。

一方、NPD 工具は、研磨仕上げ、未研磨仕上げともに、SCD 工具と比較して摩耗の進行が緩やかであり、PCD 工具とはほぼ同程度であった。両 NPD 工具では、切削距離が 500 m に達してもチップングは認められない。よって、NPD 工具は、SCD、PCD 工具と比較して、超硬合金のミーリング加工における耐久性が高いことが確認された。第 1 章でも述べたとおり、NPD はナノメートルサイズの結晶がランダムな方位でバインダ材なしで結合していることから、異方性が無くどの方位においても高い硬度を持つため、高い耐久性を示したと考えられる。表 2-1 に示した通り、SCD 工具のみチャンファ長が $1 \mu\text{m}$ であり他の工具より短い。チャンファは切削距離 500 m の時点で全ての工具において磨滅しているため、本実験ではチャンファ長の差異のチップングへの影響は少ないと推察される。ただし、SCD 工具は切削距離 100 m の時点でチャンファが磨滅しているのに対し、その他の工具は $100\sim 400 \text{ m}$ まではチャンファが有効であり、切削時のすくい角が異なっていたと考えられる。

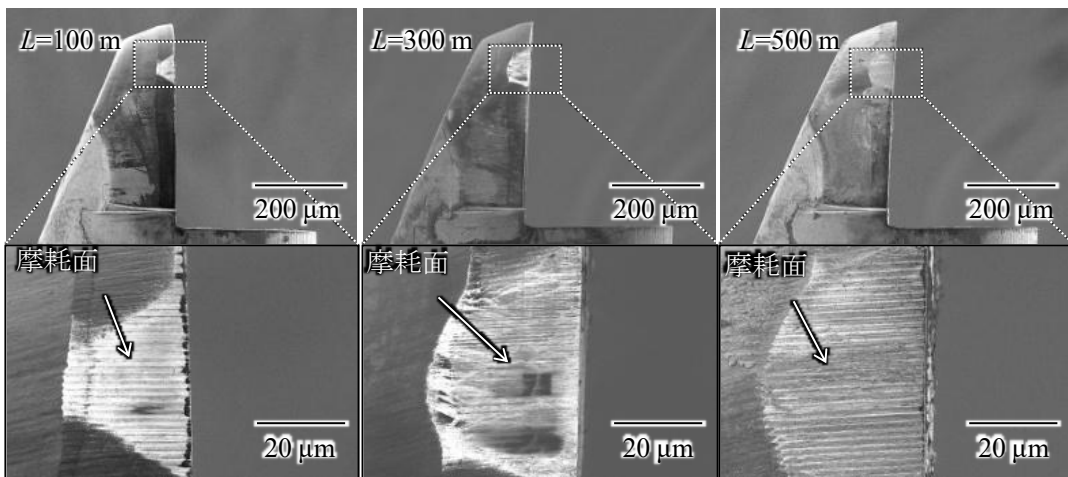
工具の摩耗による刃先後退量と切削距離の関係を図 2-5 に示す。ここで、刃先後退量とは、図 2-6 に示すように、加工前の摩耗していない状態の工具半径と摩耗により減少した工具半径の差分の最大値として定義した。前述した摩耗進行の観察結果でも示すように、PCD 工具および両 NPD 工具における刃先後退量は、切削距離 400 m まではほぼ同程度であるが、PCD 工具は切削距離 500 m にて切刃エッジ部でチップングが発生したために大きな値を示している。SCD 工具は、切削距離の伸延にともなう刃先後退量の増加が、他の工具よりも大きい。また、PCD 工具と同様に、切削距離 500 m でチップングが発生したため刃先後退量が大きく増加している。これらの結果から、超硬合金のミーリング加工において、SCD 工具は、摩耗進行による切刃エッジ部の寸法変化が大きいため、同工具を長距離加工に使用する場合は高い形状精度を達成することが難しいと考えられる。



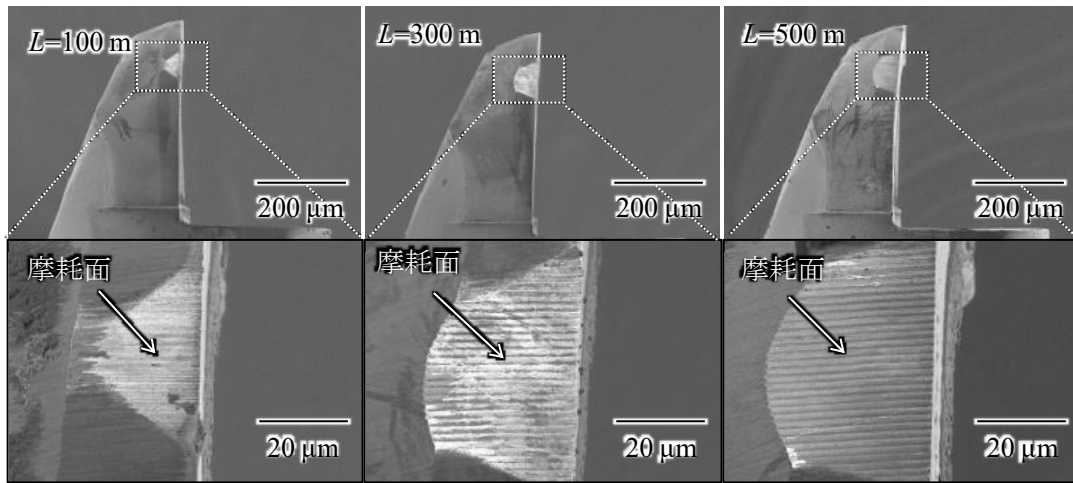
(a) SCD



(b) PCD



(c) NPD_Unpolish



(d) NPD_Polish

図 2-4 切削距離の伸延にともなう工具逃げ面における摩耗進行の様子

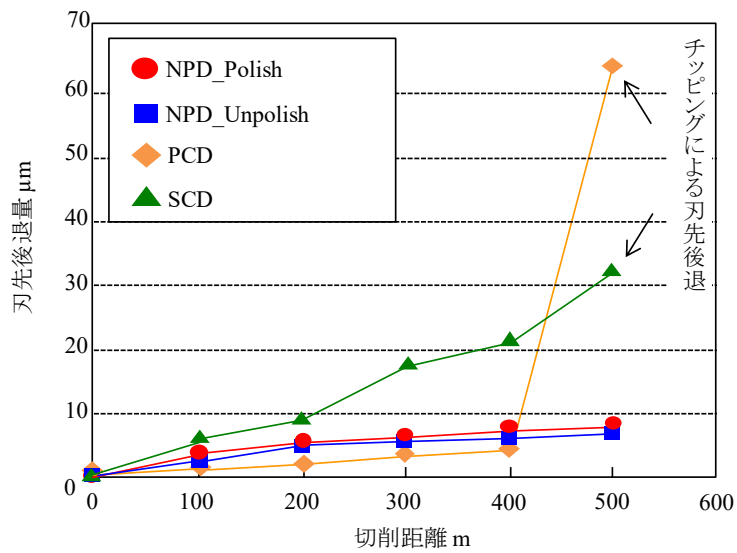


図 2-5 刃先後退量と切削距離の関係

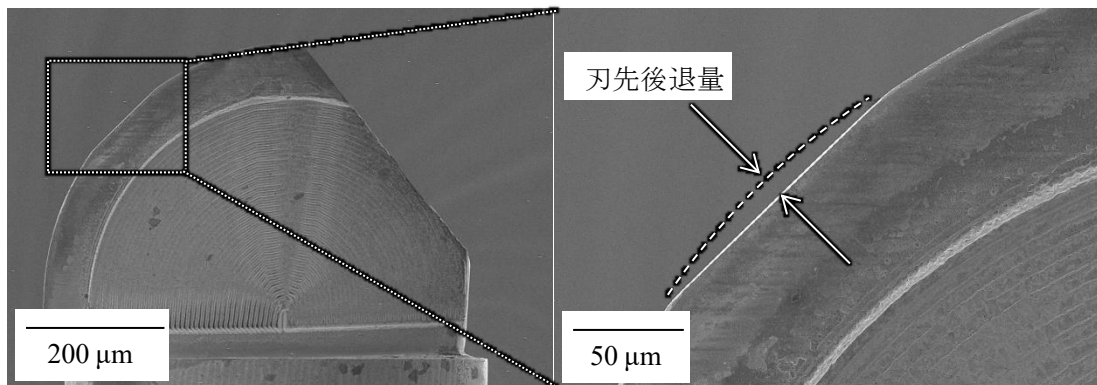


図 2-6 刃先後退量の定義

2-3-2 切削抵抗の評価

図 2-7 は、各種ダイヤモンド工具の加工中の Z 軸方向の切削抵抗のピーク値を切削距離 100 m 毎に測定した結果である。SCD 工具の切削抵抗値は切削距離の伸延にともない、概ね線形的に上昇している。SCD 工具は、図 2-4(a)および図 2-5 に示されるように、加工開始直後から摩耗の進行が早く、刃先後退量も切削距離に対して線形に増加するため、被削材と接触する摩耗面の拡大にともなう摩擦抵抗の上昇が切削抵抗値に反映していると考えられる。PCD 工具の切削抵抗値は、切削距離 300 m までは低い値を示しているが、それ以降、急激に増加している。著者らは、これまでの研究において、PCD 工具を用いて硬脆材料(単結晶シリコン、SiC 超硬合金など)のミーリング加工を行った場合、切削距離の増加にともなって工具表面に徐々に付着する切りくずの問題を指摘してきた^{56), 57)}。加工中に発生する数十 mm サイズの切りくずが工具の表面に積み重なり、化学反応によって付着物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。本実験においても、図 2-3(b)に示されるように、工具全面にわたり付着物が存在していることから、切削距離の伸延に伴う PCD 工具の切削抵抗の上昇は付着物の堆積に起因していると考えられる。なお、SCD 工具、PCD 工具のいずれも切削距離 500 m においてチッピングが発生したが、その時点における切削抵抗値は両者ともに 5 N を超えている。

一方、未研磨仕上げ、研磨仕上げの両 NPD 工具の切削抵抗値は、切削距離の伸延との相関は認められない。この理由は明らかになっていないが、今後、NPD 素材のトライボロジ試験などを実施することで現象解明を試みる予定である。未研磨仕上げ NPD 工具は切削距離 200 m において、研磨仕上げ NPD 工具は切削距離 300 m において、いずれも切削抵抗値は 5 N を超えているにもかかわらず、チッピングなどの目立った工具損傷は認められないことから、両工具は SCD、PCD 工具と比較して高い耐久性を有しているといえる。

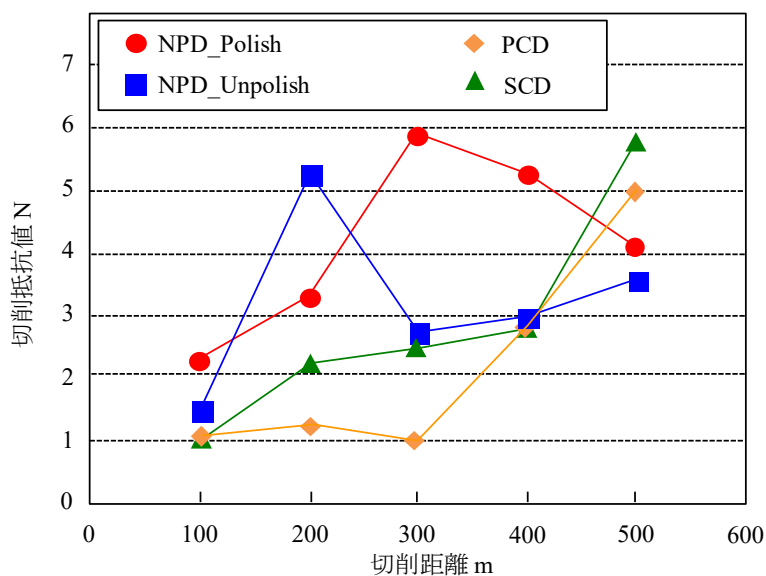


図 2-7 切削抵抗値 (Z 軸方向) と切削距離の関係

2-3-3 超硬合金の加工面性状の評価

各種工具で加工した加工面粗さと切削距離の関係を図 2-8 に、図 2-9 に加工面を白色干渉計にて測定した結果を示す。面粗さは切削送り方向と直交する方向(ピックフィード方向)に測定した値とした。

SCD 工具は、切削距離 400 m までは 20 nmRa 以下の面粗さを維持しているが、切削距離 500 m において切刃エッジ部にチッピングが発生したために、面粗さは 30 nmRa まで増大した。

PCD 工具では、切削距離 200 m までの面粗さは 20 nmRa 程度であり、SCD 工具と同等の面粗さが得られたが、切削距離の伸延とともに面粗さの増大が認められた。これは、前述したように、切削距離が延びるにつれて付着物が工具表面に徐々に堆積するために、工具の切削性能が劣化したことが原因であると考えられる。切削距離 500 m では切刃エッジ部に大きなチッピングが発生したために面粗さは 100 nmRa 以上の値を示した。

一方、未研磨仕上げ、研磨仕上げの両 NPD 工具で加工した面粗さにおいて大きな差異が認められた。切削距離 300 m までは両者はほぼ同等の 20 nmRa 以下の面粗さであるが、未研磨仕上げ NPD 工具は、切削距離 400 m から面粗さが増大し、切削距離 500 m では 100 nmRa 以上の値を示した。一方、研磨仕上げ NPD 工具では切削距離が 500 m に達しても 20 nmRa 以下の面粗さを維持していた。

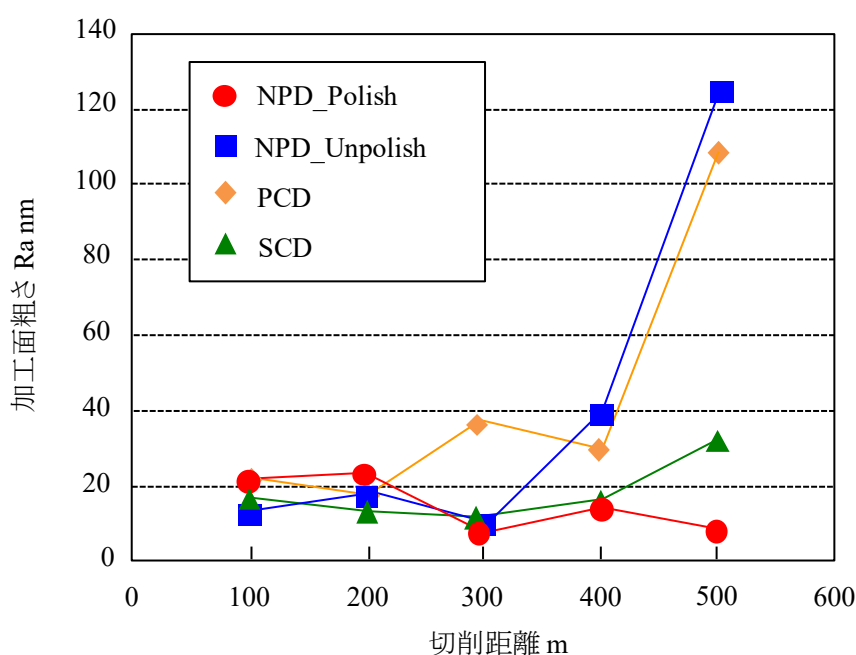
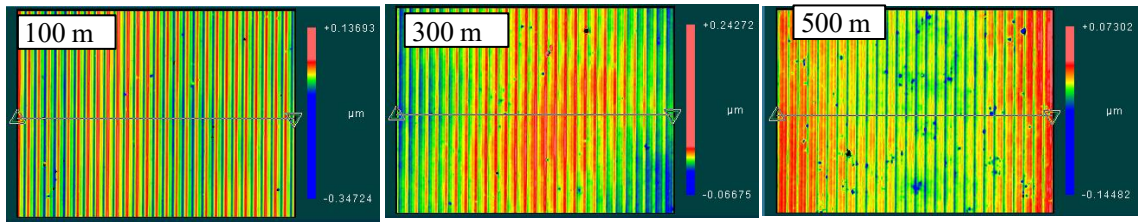


図 2-8 加工面粗さと切削距離の関係

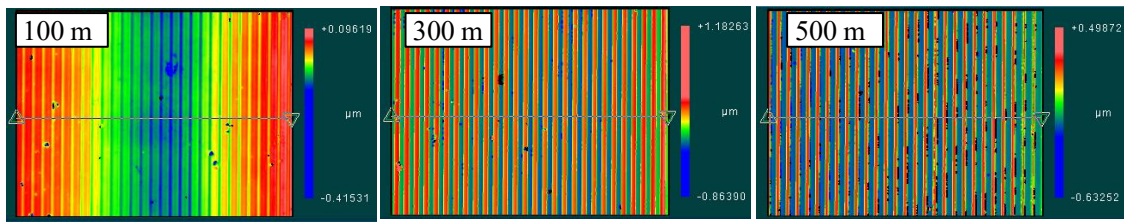


PV 484.2 nm, Ra 21 nm

PV 309.5 nm, Ra 8 nm

PV 217.8 nm, Ra 10 nm

(a) NPD_Polish

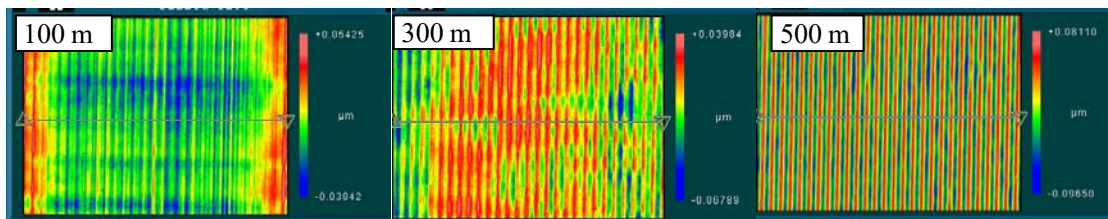


PV 511.5 nm, Ra 41.4 nm

PV 2046.5 nm, Ra 183 nm

PV 1131.2 nm, Ra 158 nm

(b) NPD_Unpolish

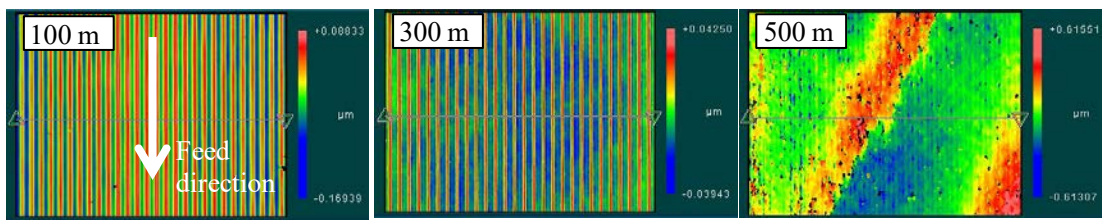


PV 92.7 nm, Ra 21 nm

PV 107.7 nm, Ra 14 nm

PV 177.6 nm, Ra 33 nm

(c) SCD



PV 257.7 nm, Ra 39 nm

PV 81.9 nm, Ra 13 nm

PV 1228.6 nm, Ra 111 nm

(d) PCD

図 2-9 各種ダイヤモンド工具による加工面の白色干渉計での測定結果

2-3-4 NPD 工具の逃げ面粗さの影響

前節の図 2-8 で示したように、未研磨仕上げの NPD 工具では切削距離が大きくなると、加工面の面粗さが大きく増大した。この原因を調査する目的で、本節では、未研磨仕上げ、研磨仕上げの両 NPD 工具の切刃エッジ部の仕上げ状態が加工面粗さに及ぼす影響を調べるため、工具逃げ面の面粗さに着目して検討を加えた。

それぞれの工具の切削距離における工具逃げ面の面粗さを測定した結果を図 2-10 に、摩耗した各工具の逃げ面の 3 次元プロフィールを図 2-11 に示す。図 2-10 に示される逃げ面の面粗さと、図 2-8 で示される加工面の面粗さは、相関があることがわかる。未研磨仕上げ NPD 工具では、切削距離 400 m を超えた時点から加工面粗さと工具逃げ面粗さが増大している。一方、研磨仕上げ NPD 工具では、切削距離全体にわたって、加工面粗さと工具逃げ面粗さは小さい値を示している。この両 NPD 工具間における加工特性の差異は、工具の仕上げ状態の違いによる影響であると考えられる。すなわち、切削距離の伸延により摩耗が進行し、工具の切刃チャンファ部分が完全に磨滅した後は、工具の逃げ面が優先的に被加工面と接触することから、逃げ面の仕上げ状態が被削材の面粗さに及ぼす影響が大きくなったと推測される。図 2-1(c), (d) に示すとおり、未研磨仕上げ NPD 工具の初期の逃げ面粗さは、研磨仕上げ NPD 工具のそれと比較すると 7 倍ほど大きいことから、摩耗の進行に伴う工具逃げ面および加工面粗さの劣化の要因となったものと推察される。摩耗した工具の逃げ面の形状を観察すると、図 2-11 に示すように、逃げ面には周期的な凹凸が形成されていた。この凹凸の周期はピックフィードと同様の 5 μm であり、図 2-9 に示したように加工面の凹凸の周期も同様の 5 μm であることから、加工面に形成されたピックフィードによる凹凸が工具に転写されたものと考えられる。

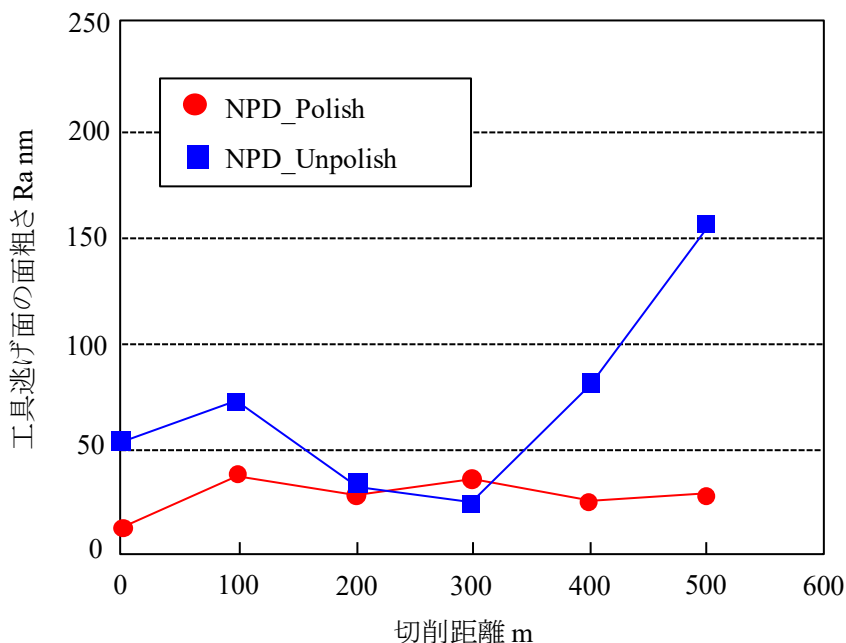
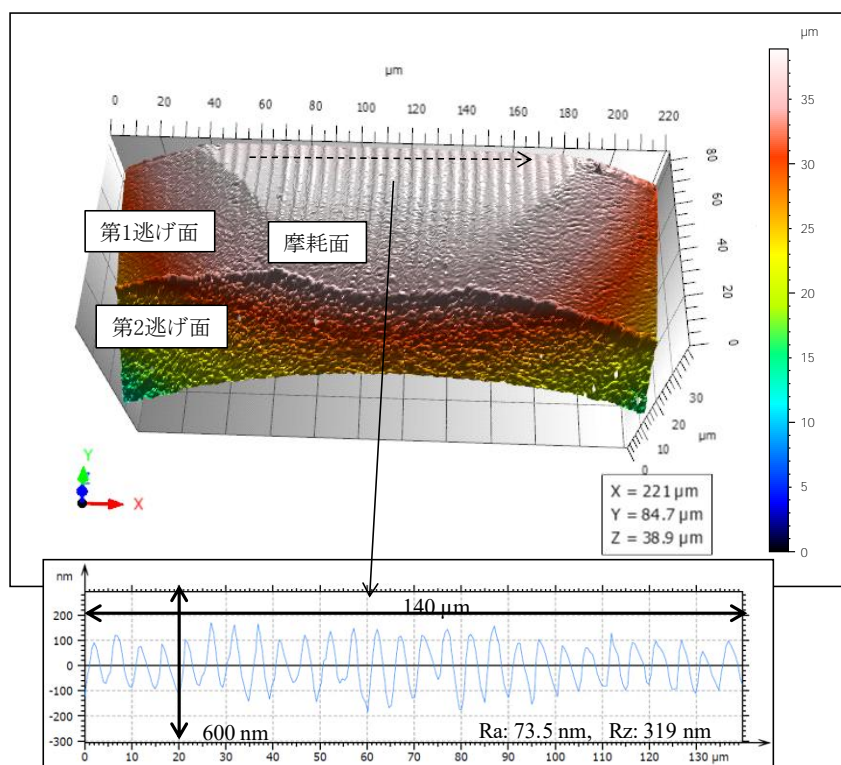
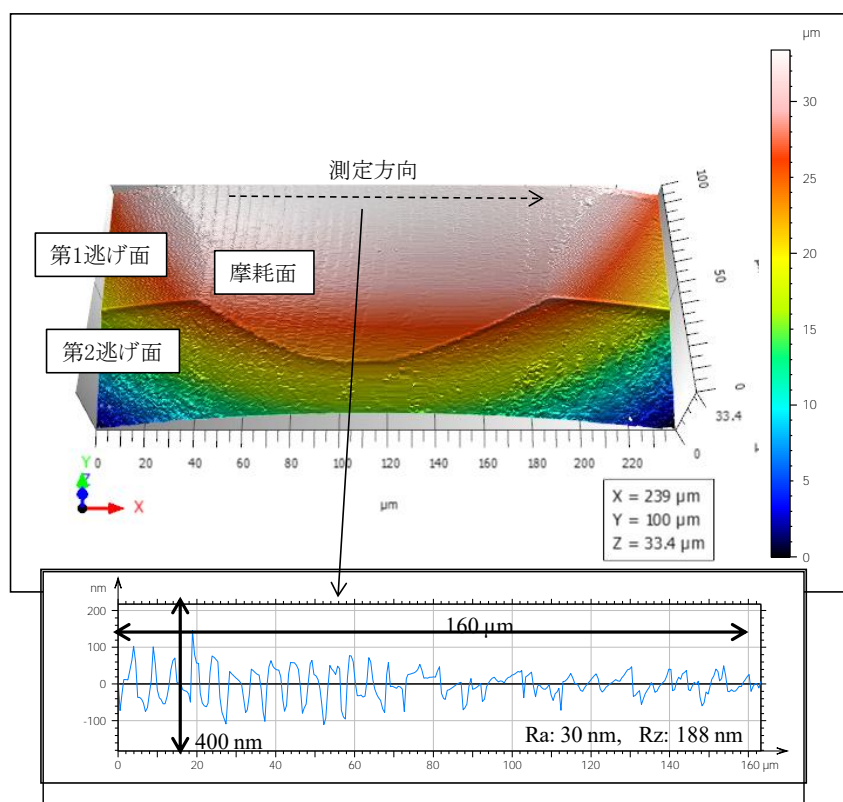


図 2-10 工具逃げ面の面粗さと切削距離の関係



(a) NPD_Unpolish



(b) NPD_Polish

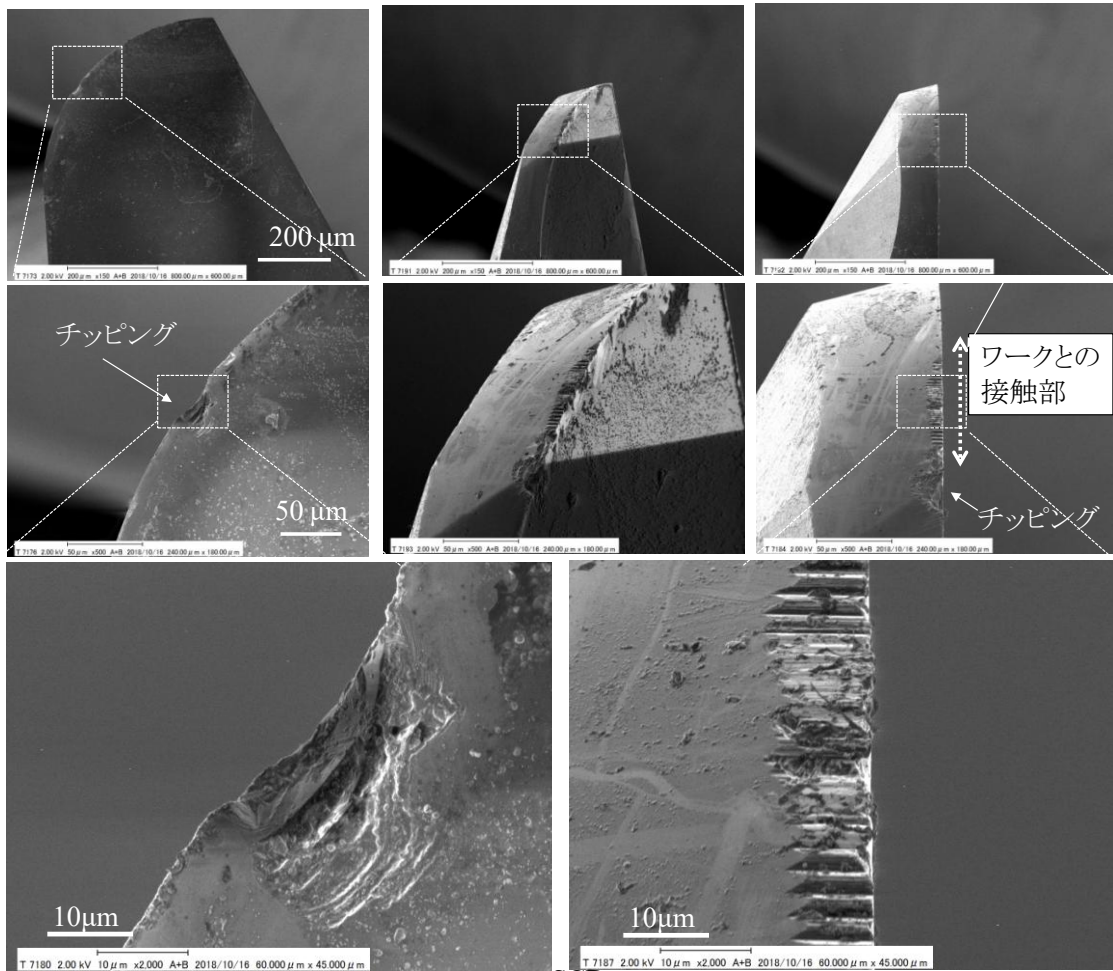
図 2-11 切削距離 400 m における各 NPD 工具の摩耗した逃げ面の 3 次元形状測定結果

2-3-5 高負荷加工条件での加工

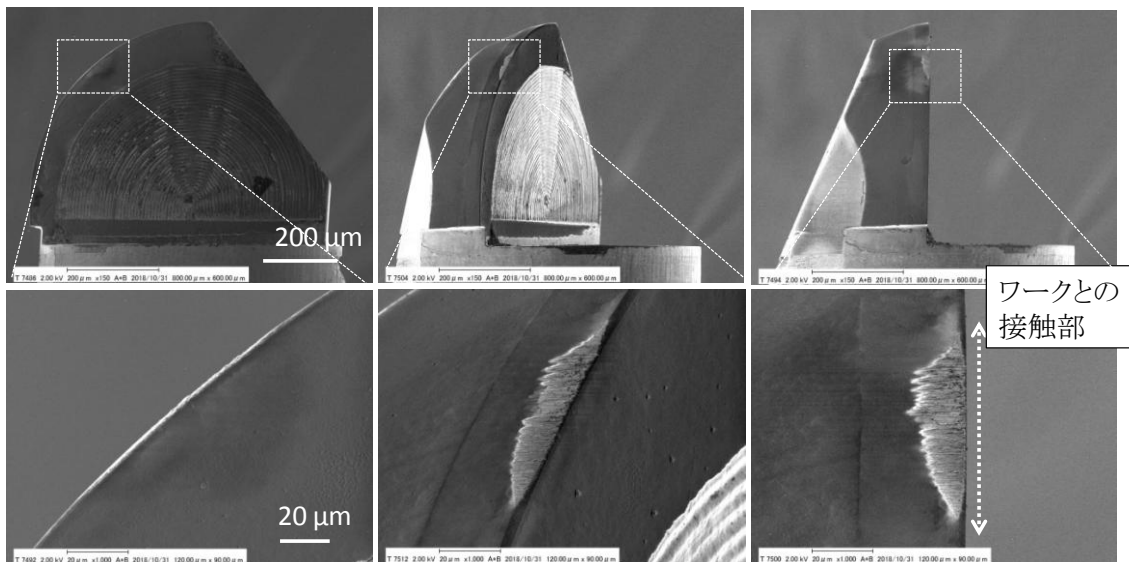
前節までは、使用した全種の工具でチップングなどの異常摩耗が発生せず良好な加工結果が得られる統一された条件である切込み量 $0.5\ \mu\text{m}$ の加工結果を示してきたが、実際の生産現場においては中仕上げ加工などの用途でより高負荷な条件で工具が使用されることが想定される。そこで本節では加工負荷を大きくした切込み量 $5\ \mu\text{m}$ での加工評価を行った。前述の結果より、PCD 工具では加工面の荒れや耐久性の観点から高負荷での加工は困難と思われるため、今回の実験では未使用とした。また未研磨仕上げ NPD 工具の耐久性は研磨仕上げ NPD 工具と変わらないことが予想されるため、使用していない。本実験では研磨仕上げ NPD 工具と SCD 工具の比較を行った。

図 2-12 にテーブル送り速度 $600\ \text{mm/min}$ で $50\ \text{m}$ 加工を行った後の各工具の SEM 画像を示す。図 2-12(a)からも明らかなように、SCD 工具では大きなチップングが発生していた。チップングは、工具の回転中心からの距離が大きくなり、周速も速くなる工具外周方向で発生していることがわかる。一方 NPD 工具では、図 2-12(b)に示すように、チップングは見られず、切込み量が大きい加工においても NPD 工具の耐久性の高さが確認された。

加工面の面粗さを白色干渉計により測定した結果を図 2-13 に示す。SCD 工具での加工面の面粗さは、工具のチップングの影響から $300\ \text{nmRa}$ と、切込み量 $0.5\ \mu\text{m}$ 時の約 $20\ \text{nmRa}$ と比較しても明らかに大きい値を示した。一方 NPD 工具では加工面粗さが $20\ \text{nmRa}$ 程度と、切込み量 $0.5\ \mu\text{m}$ での加工時とほぼ同等の加工面が得られた。これらから、NPD 工具は切込み量を大きく設定しても、良好な加工面が得られ、SCD 工具と比較して高能率加工にも適用できることが確認された。

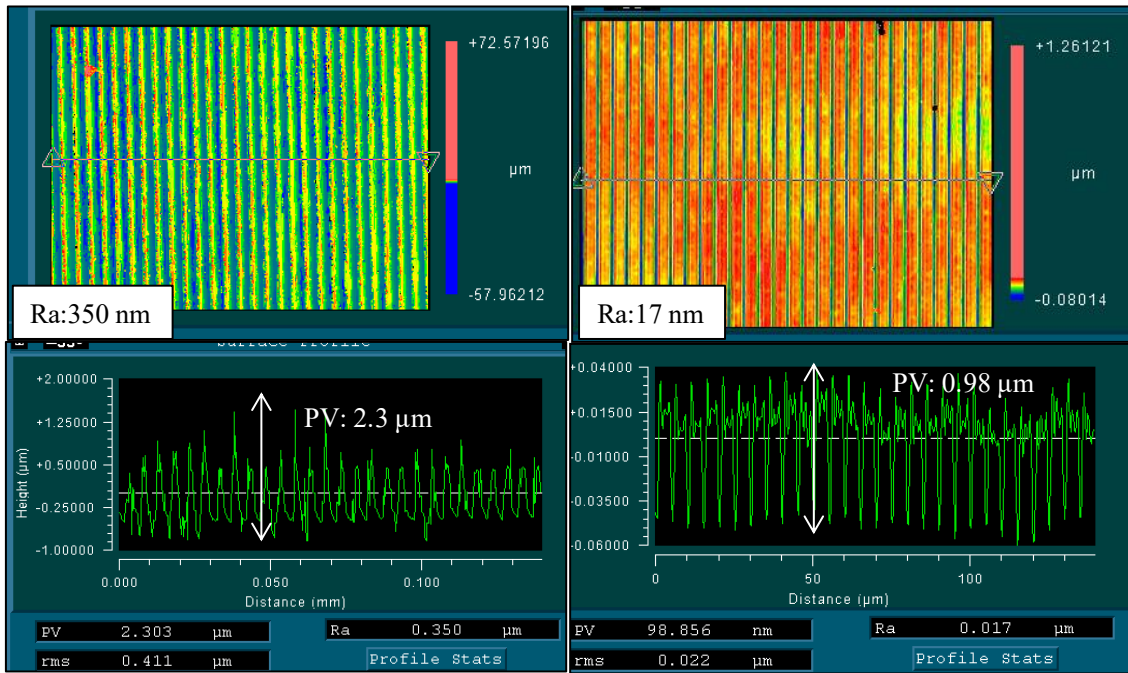


(a) SCD



(b) NPD_Polish

図 2-12 切込み量 5 μm にて切削距離 50 m を加工した後の各工具の SEM 画像



(a) SCD

(b) NPD_Polish

図 2-13 各工具による加工面の白色干渉計での測定結果

2-3-6 NPD工具の寿命評価

SCD 工具, PCD 工具ではテーブル送り速度 600 mm/min, 切削距離 500 m でチッピングが発生したが, NPD 工具ではチッピングは観測されなかった. そこで, NPD 工具の耐久性を調査する目的で, NPD 工具のみさらに切削距離を伸延させ工具寿命の評価を行った. 工具損傷の確認は, 100 m の加工が終わった時点で, カメラによる目視にて工具の状態を観察し, チッピングなどの工具損傷の有無を確認した.

結果として, 合計切削距離が 1200 m に達しても, 研磨済み NPD 工具にチッピングは見られなかった. 刃先後退量の測定値を図 2-14 に示す. 本節での測定結果は切削距離 1200 m 時のものみになるが, 比較のため, 図 2-5 に示した別工具での刃先後退量も示した. 本実験での研磨仕上げ NPD 工具での切削距離 1200 m における刃先後退量は $9\ \mu\text{m}$ であり, 別の研磨仕上げ NPD 工具での切削距離 500 m での刃先後退量が $8\ \mu\text{m}$ であったことを考慮すると, 切削距離に対する刃先後退量の増大は非常に小さく飽和傾向が見られた. 切削距離が短く, 摩耗が進行していない場合, 被加工物と工具の接触面積も小さく, 面積当たりの負荷が高いため加工初期の刃先後退量が大きくなることも刃先後退量が飽和する要因の一つと考えられる.

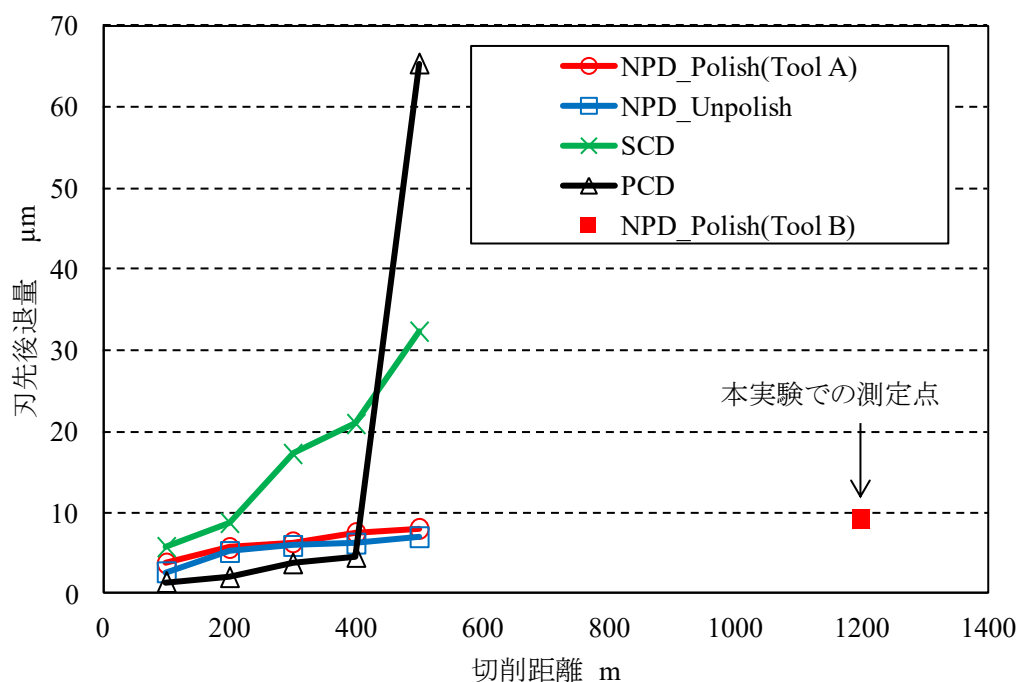


図 2-14 刃先後退量の切削距離の関係

2-4 結言

NPD 工具をはじめとした各種ダイヤモンド工具の加工特性の差異を検証することを目的として、同形状の NPD, PCD, SCD 工具を用意し、統一した加工条件下にて、超硬合金を加工する際の各工具の摩耗挙動や、被削材の加工面粗さとの関連を詳細に分析した。また、NPD 工具に関してのみ、逃げ面、すくい面に研磨仕上げを施していない工具と、研磨仕上げを施した工具の 2 種類の工具を用いて同様の加工実験を行った。以下に得られた結果をまとめる。

- (1) SCD 工具は、切削距離 400 m までは 20 nmRa 以下の加工面粗さを維持しているが、切削距離 500 m において切刃エッジ部にチップングが発生したために面粗さは 30 nmRa まで増大した。PCD 工具は、切削距離 200 m までは 20 nmRa 程度と SCD 工具と同等の面粗さが得られたが、切削距離の伸延とともに加工面粗さが増大し、切削距離 500 m では切刃エッジ部に大きなチップングが発生したため、面粗さは 100 nmRa 以上の値を示した。
- (2) NPD 工具は、切削距離が 1200 m に達してもチップングは認められなかった。NPD 工具は、SCD, PCD 工具と比較して、超硬合金のミーリング加工における耐久性が高いことが確認された。また評価実験に使用したすべての工具材種において、工具摩耗が正常に進行する工具法線方向切込み量として 0.5 μm を採用したが、NPD 工具は切込み量を 5 μm としてもチップングが発生せず、他のダイヤモンド系工具と比較して、優れた工具であることが確認された。
- (3) 未研磨仕上げ NPD 工具は、切削距離 400 m から面粗さが増大し、切削距離 500 m で 100 nmRa 以上の値を示した。一方、研磨仕上げ NPD 工具では切削距離が 500 m まで達しても 20 nmRa 以下の面粗さを維持していた。未研磨仕上げ NPD 工具、研磨仕上げ NPD 工具の加工特性の差異は、工具の仕上げ状態の違いによる影響が大きい。工具逃げ面の仕上げ状態が加工面粗さに及ぼす影響が大きいことから、工具成形プロセスにおいて、逃げ面の面粗さを小さくすることが重要になることが確認された。

第3章 パルスレーザによるダイヤモンドの基礎加工特性

3-1 序言

第2章で述べた通り, NPD 工具は SCD, PCD 工具より高い耐久性・加工性能を持つが, NPD 自体の加工の困難さから, 現状は工具製作を研磨により行っているため, 製作に時間を要し, 工具コストが高く, 普及が進んでいないという課題がある. また NPD の高い性能を発揮するには高精度かつ滑らかな切れ刃が必須となる.

そこで本章では NPD を高能率かつ高品位に加工する方法として, パルスレーザによる加工に着目し NPD の基礎加工実験を行った. 実験には主にナノ秒パルスレーザ, フェムト秒パルスレーザを用い, レーザ出力, 波長, レーザ走査速度, レーザ照射方向などの加工条件を変更しながら加工を行い, 最適な加工条件の調査を行った.

レーザ加工の達成目標値は, 市販の研磨仕上げ NPD 工具の測定結果などから, 表 3-1 のように設定した. 加工効率は直径 1 mm 程度の工具を 30 分以内に加工できることを目標とし, 1 mm^3 の立方体を 20 分程度で完全に除去できる加工効率があれば十分と考え, 目標値を $0.001 \text{ mm}^3/\text{sec}$ と設定した. 面粗さは加工に直接関与しない箇所面の目標値を $0.3 \text{ }\mu\text{mRa}$, 加工時に被削材に接触するエッジ部の目標値を $0.05 \text{ }\mu\text{mRa}$ とした. 工具には, ある程度鋭いエッジが求められる場合があるため, レーザ加工した先端のエッジ半径の目標値を $1 \text{ }\mu\text{m}$ 以下とした. また, レーザで加工を行った後に, 研磨や洗浄などのポストプロセスが必要となる場合, 段取り変えなどからより製作時間がかかるため, レーザ工程のみで最終の工具形状まで加工できることを目標とした.

表 3-1 NPD 工具成形に必要となるレーザ加工の達成目標値

	粗加工	仕上げ加工
加工効率	$>0.001 \text{ mm}^3/\text{sec}$	-
面粗さ	$0.3 \text{ }\mu\text{mRa}$	$0.05 \text{ }\mu\text{mRa}$
エッジ半径	-	$R1 \text{ }\mu\text{m}$
その他	ポストプロセス不要	

3-2 実験方法

3-2-1 レーザ加工機の仕様

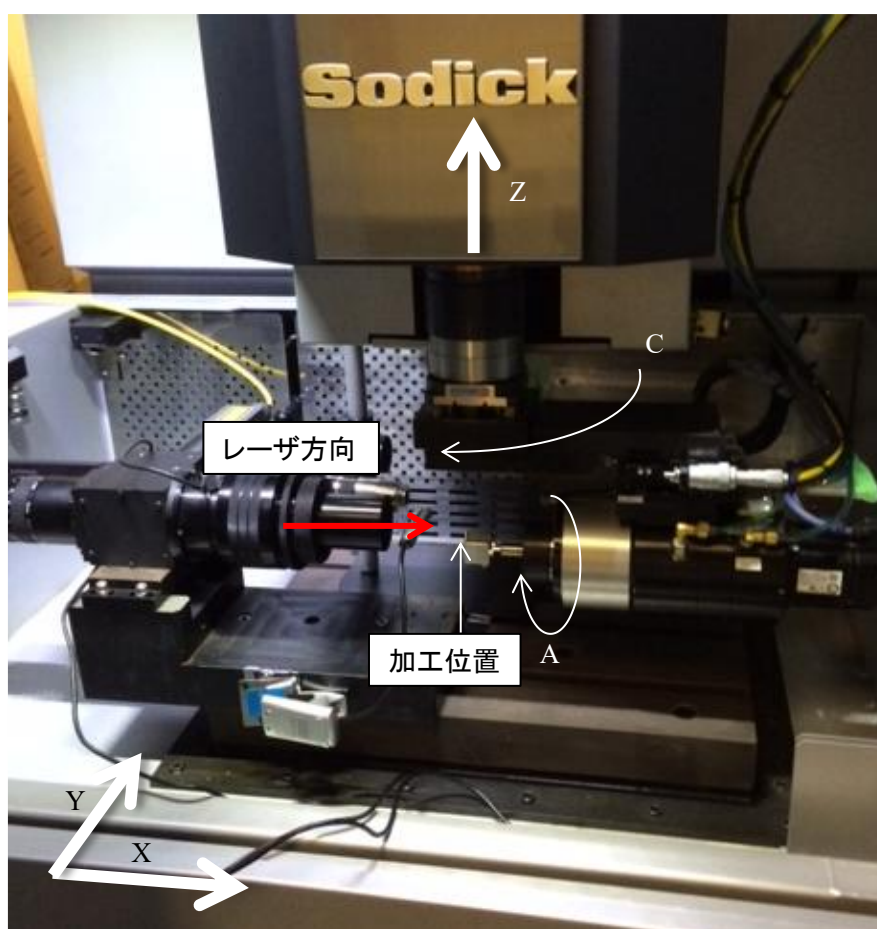
実験には、ナノ秒パルスレーザー、フェムト秒パルスレーザーの 2 種類のレーザーを使用した。またナノ秒パルスレーザー加工においては、レーザーを高速に走査させる機構であるガルバノスキャナの有用性を評価するため、ガルバノスキャナ無し、有りの 2 種の加工機を用いた。各レーザー加工機の外観を図 3-1、仕様を表 3-2 に示す。ガルバノスキャナは、ガルバノモータ先端のレーザー光反射鏡(ガルバノミラー)を 2 軸(XY)で制御することによってレーザー光を対象にピンポイントで照射するための制御装置である。ガルバノスキャナの構成模式図を図 3-2 に示す。

ガルバノスキャナ無しのナノ秒パルスレーザー加工機としては、精密型彫り放電加工機 AP3L(ソディック)に IPG 製のナノ秒パルスレーザーソースを搭載させ使用した(図 3-1(a))。ガルバノスキャナ搭載ナノ秒パルスレーザー加工機は LASERTEC20(DMG/MORI)を使用した。フェムト秒パルスレーザー加工機としては、IMRA America 製のフェムト秒パルスレーザー発振器 DE-1050 をガルバノスキャナ搭載かつ 3 軸(XYZ 軸)のステージを持つ簡易加工機を用いた(図 3-1(b))。

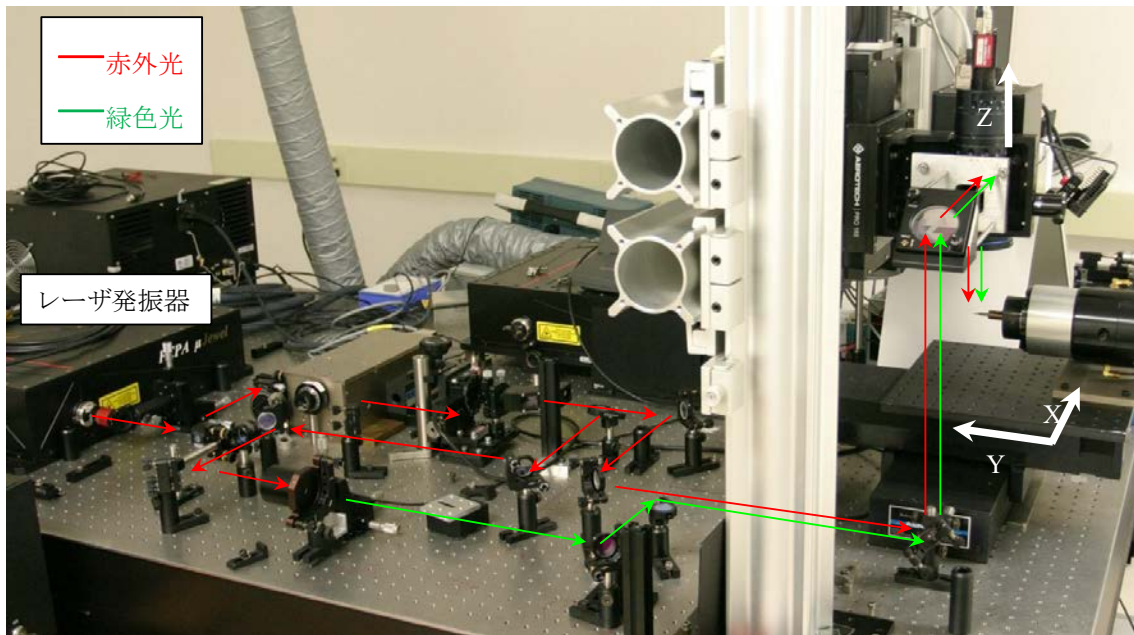
軸移動加工の長所として、装置が比較的簡単な構造をしており、機械精度が出し易い点、X,Y,Z の機械軸と回転軸とを組み合わせた多軸加工ができるため、複雑な三次元形状を作製できる点が挙げられるが、短所としては、レーザー送り速度が機械軸の移動速度になるため、速度に限界があるという点がある。ガルバノスキャナを用いた加工の長所としては、電磁気的な信号でミラーの角度を変化させることで、反射されるビームの位置を変えるため、レーザーを高速で走査させることができる。(リニアステージの 10 倍以上)、短所として、通常の NC プログラムでは動かさないため、専用のソフトが必要となる点、他の機械軸とガルバノミラー系を組み合わせた多軸加工が現状では困難なため、複雑な三次元形状の加工が難しいことが挙げられる。また構造が X 軸ミラー、Y 軸ミラー、f θ レンズなどから構成されており複雑、またミラーから加工位置の距離が大きくなると微小な角度誤差が大きくなるとレーザー照射位置の誤差となり、精度が出し難いという点がある。

表 3-2 レーザ加工機の仕様

装置名称	LASERTEC20	AP3L	-
装置メーカー	DMG/MORI	Sodick	-
レーザー発振器	YLP-HP-1-120-100-100	YLP-1-100-20-20	DE1050
レーザーメーカー	IPG	IPG	IMRA America
平均出力	100W	20 W	10 W
繰り返し周波数	2-100 kHz	20-200 kHz	200 kHz
パルス幅	400 ns	100 ns	350 fs
レーザー走査方法	ガルバノスキャナ	軸移動	ガルバノスキャナ
レーザー走査速度	<4000 mm/sec	<200 mm/min	<4000 mm/sec
レーザー波長	1064 nm	1064 nm	1045 nm 522 nm(SHG 素子使用時)
パルスエネルギー	1 mJ	1 mJ	50 μ J



(a) 軸移動ナノ秒パルスレーザー加工機(AP3L)



(b) ガルバノスキャナ搭載フェムト秒パルスレーザー加工機(DE1050)

図 3-1 各レーザー加工機の外観

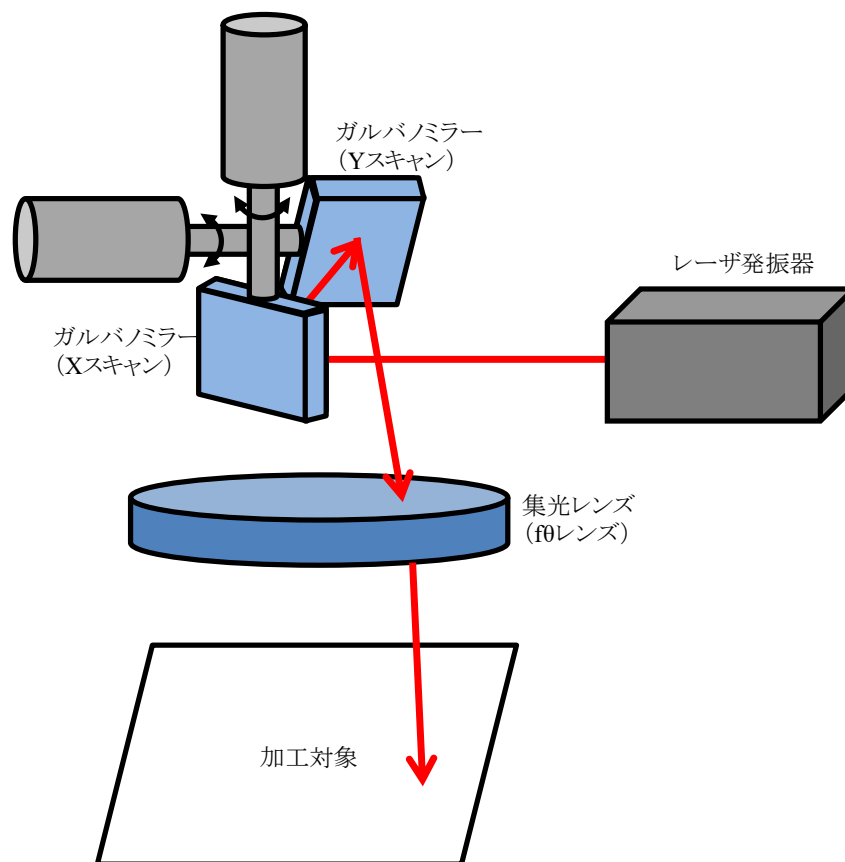


図 3-2 ガルバノスキャナの構成模式図

3-2-2 加工形状・加工方法

被加工材には住友電工ハードメタル社が提供する NPD を用いた。NPD と、比較のため SCD のレーザ加工に関連する特性を表 3-3 に示す^{58), 59)}。

表 3-3 NPD・SCD の光学特性

	SCD	NPD
密度	3.52 g/cm ³	
熱伝導度	600-2000 W/m·k	297 W/m·k
反射率(波長 1045nm)	2.447	2.408
〃 (波長 522nm)	2.45	2.425
透過率(波長 1045nm)	0.697	0.6863
〃 (波長 532nm)	0.686	0.556
吸収係数(波長 1045nm)	0.475 /cm	3.597 /cm
〃 (波長 532nm)	0.075 /cm	0.135 /cm

基礎的な加工として、レーザを加工対象に垂直に照射して加工する方法(以下、垂直レーザ加工とする)とレーザ外周部を用いて加工対象に平行に照射して加工する方法(以下、平行レーザ加工とする)の2通りを試みた。

本実験での垂直レーザ加工による加工方法を図 3-3(a)に示す。同図のように、ある矩形範囲を一定の間隔で往復走査させることでポケット形状を加工した。加工中は焦点位置を動かさずに加工を行い、各パラメータ(レーザパワー、繰り返し周波数、レーザ走査速度、加工回数)を変えながら、加工に適した条件を調査した。平行レーザ加工での加工方法を図 3-3(b)に示す。平行レーザ加工では、図のようにある範囲を往復走査させながら、焦点を下降させていくことでレーザ外周部を用いて壁面を加工した。こちらも各パラメータ(レーザパワー、繰り返し周波数、レーザ走査速度)を変えながら、平行レーザ加工に適した条件を調査した。

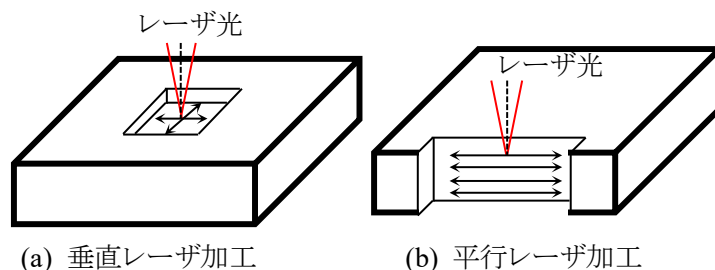


図 3-3 垂直レーザ加工と平行レーザ加工の模式図

3-2-3 加工面の評価方法

レーザー加工後の加工面の面粗さは非接触オートフォーカス式輪郭測定装置 MLP-2SP(三鷹光器製)により測定した。またレーザー加工による表面の変質はラマン顕微鏡 InVia Raman Microscope (Renishaw 製)を用いたラマン分光法により検出した。ラマン分光法は、試料に単色光を入射した際に、光が試料の持つ分子振動と相互作用をすることで、入射した単色光と異なる波長をもつラマン散乱光が発生することを利用し、入射光とラマン散乱光のシフト分の波長から、試料の分子振動のエネルギーを解析することで、試料を同定する手法である。ダイヤモンドでは熱影響によるグラファイトへの変質の有無を確認できる⁶⁰⁾。レーザー加工された表面状態の観察は走査型電子顕微鏡 (SEM)により行った。

3-3 実験結果

3-3-1 レーザ走査速度の加工面への影響

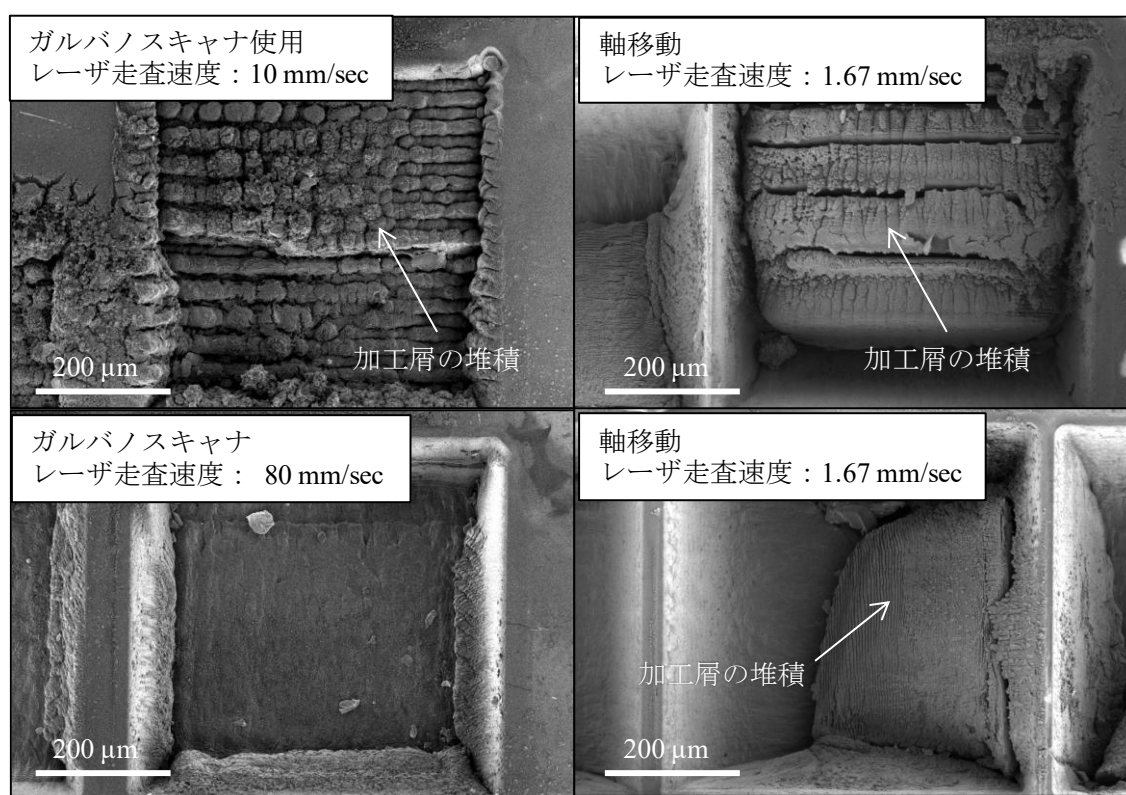
まず、軸移動ナノ秒パルスレーザー、ガルバノスキャナナノ秒パルスレーザーの2種の加工機を用い、NPD に対して垂直レーザー加工にてポケット形状を加工した。加工機の仕様の関係で、条件は完全に同一ではないが、加工時間あたりの照射エネルギーがほぼ同様になるように加工条件を決定した。加工条件と変更したパラメータの範囲を表 3-4 に示す。軸移動での加工とガルバノスキャナを用いた加工での最も大きな差異はレーザー走査速度であるため、本実験ではレーザー走査速度のみを変更し加工を行った。レーザー加工の最終目的が半径 0.5 mm 程度の工具の成形であることから、加工面積は 0.5 mm × 0.5 mm とした。微小な領域の加工では、軸移動の加速度には限界があるため、軸移動での最大速度である 100 mm/min (≈ 1.67 mm/sec)でのみ加工を行った。ガルバノスキャナでは 10~80 mm/sec のレーザー速度で加工を行った。

図 3-4 にレーザー加工後の NPD を SEM により観察した結果を示す。SEM 画像からわかるように、特に軸移動のナノレーザー加工面には加工層が堆積していることが確認された。また、ガルバノスキャナを用いた加工においても、レーザー走査速度が小さい場合においては同様に加工層の堆積が見られた。ナノ秒パルスレーザーでの加工は熱加工的であることから、レーザー照射により加熱された NPD 表層がグラファイト化し、グラファイトが昇華・燃焼することで加工が進行すると考えられるが、この加工層は昇華したグラファイトが冷えて加工面に再凝固し堆積したものと推察される⁶¹⁾。軸移動での加工で加工層の付着が顕著に見られるのは、レーザーの走査速度が小さいため、各パルス間でのビーム照射面積のオーバーラップ率が大きくなり、熱影響がより大きくなることが原因として考えられる。また、軸移動によるレーザー走査速度の小ささから 1 層あたりの加工体積が大きくなり、加工層の量自体が多くなることも影響していると考えられる。この加工層の付着は、加工層によりレーザーが遮られるなどの要因から、加工深さの制御を難しくするとともに、最終的には除去工程が必要になり、NPD の高精度・高能率加工には適していないと考えられる。そのため、ガルバノスキャナなどの何らかのレーザーを高速に走査させる機構が必須であることが確認された。図 3-5 にはガルバノスキャナを用いたナノ秒パルスレーザー加工時のパルス間隔(レーザー走査速度)と面粗さの関係を示した。軸移動を用いた加工方式では、前述した加工層により加工面粗さの測定が行えなかった

ため、ガルバノスキャナを用いた加工結果のみを示している。パルス間隔 d は、レーザ走査速度を v 、パルス繰返し周波数を f としたとき、 $d=v/f$ と定義した。図 3-5 に示すようにパルス間隔を小さく、すなわちレーザ走査速度を小さくすると、前述の通り、加工層が堆積し面粗さが増大している。

表 3-4 各加工機でのレーザ加工条件

	軸移動 ナノ秒パルスレーザ	ガルバノスキャナ ナノ秒パルスレーザ
平均出力	<8 W	<10 W
パルスエネルギー	<1 mJ	<1 mJ
繰返し周波数	50 kHz	10 kHz
波長	1063 nm	1063 nm
パルス幅	100 ns	400 ns
レーザ走査速度	100 mm/min (1.67 mm/sec)	10-80 mm/sec
ビーム径	40 μm	40 μm



(a) ガルバノスキャナ使用

(b) 軸移動

図 3-4 ナノ秒パルスレーザでの NPD 加工面の観察結果

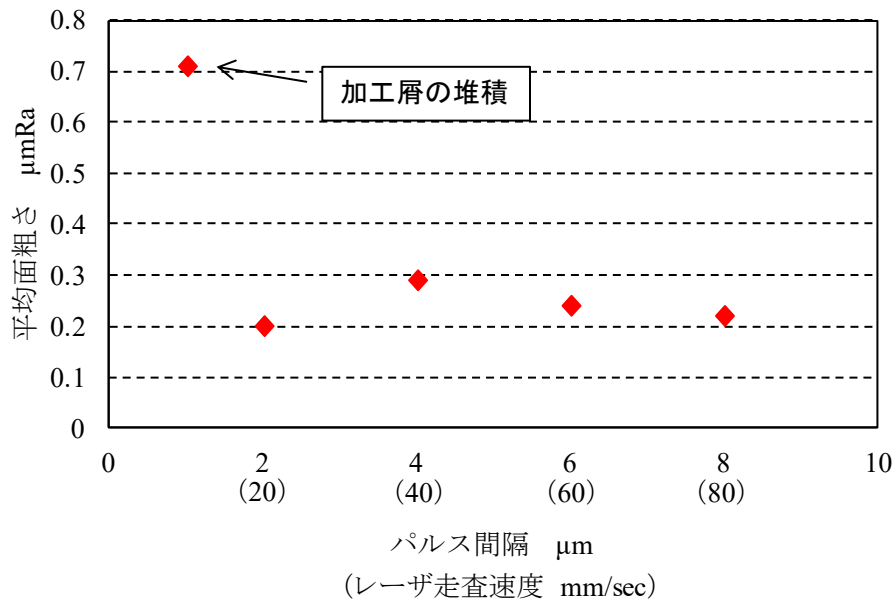


図 3-5 パルス間隔と加工面粗さの関係

3-3-2 加工効率・面粗さのレーザー出力依存性

前節にて述べた通り, 加工屑の付着を低減させるにはレーザー走査速度をある程度以上に保つ必要があり, 機械軸移動でのレーザー加工では目的とする加工品質を得られないと判断したため, これ以降の実験ではガルバノスキャナを用いたレーザー走査方式にて NPD のレーザー加工特性の検証を行った. 本節では垂直レーザー加工におけるレーザー出力と加工面の状態の関係をナノ秒パルスレーザー, フェムト秒パルスレーザーを用いて調査した結果について述べる. 加工条件を表 3-5 に示す. ナノ秒パルスレーザーとフェムト秒パルスレーザーでパルス間隔は $2 \mu\text{m}$ になるように統一した.

表 3-5 各レーザーでの NPD 加工条件

	ナノ秒パルスレーザー	フェムト秒パルスレーザー
平均出力	<10 W	<5 W
パルスエネルギー	<1 mJ	<0.025 mJ
繰り返し周波数	10 kHz	200 kHz
波長	1063 nm	1045 nm
レーザー走査速度 (パルス間隔)	20 mm/sec ($2 \mu\text{m}$)	400 mm/sec ($2 \mu\text{m}$)
ビーム径	$40 \mu\text{m}$	$40 \mu\text{m}$

ナノ秒、フェムト秒の両レーザを NPD に垂直に照射し加工した面を SEM により観察した結果の一例を図 3-6 に、照射するレーザビームの平均出力を変えながら加工を行った際の平均出力と体積除去率、面粗さの関係を図 3-7, 図 3-8 に示す。

図 3-7(d)に示す通り、ナノ秒パルスレーザでは 7 W 以上の平均出力で加工を行った場合、加工層の付着が特に顕著になり、加工面が加工層により充填されたような状態になっていた。この問題により、ナノ秒パルスレーザは仕様上の最大平均出力としては 10 W (繰り返し周波数 10 kHz 時)まで上げることができるものの、加工層が付着しない条件とするためには平均出力が制限されることとなる。

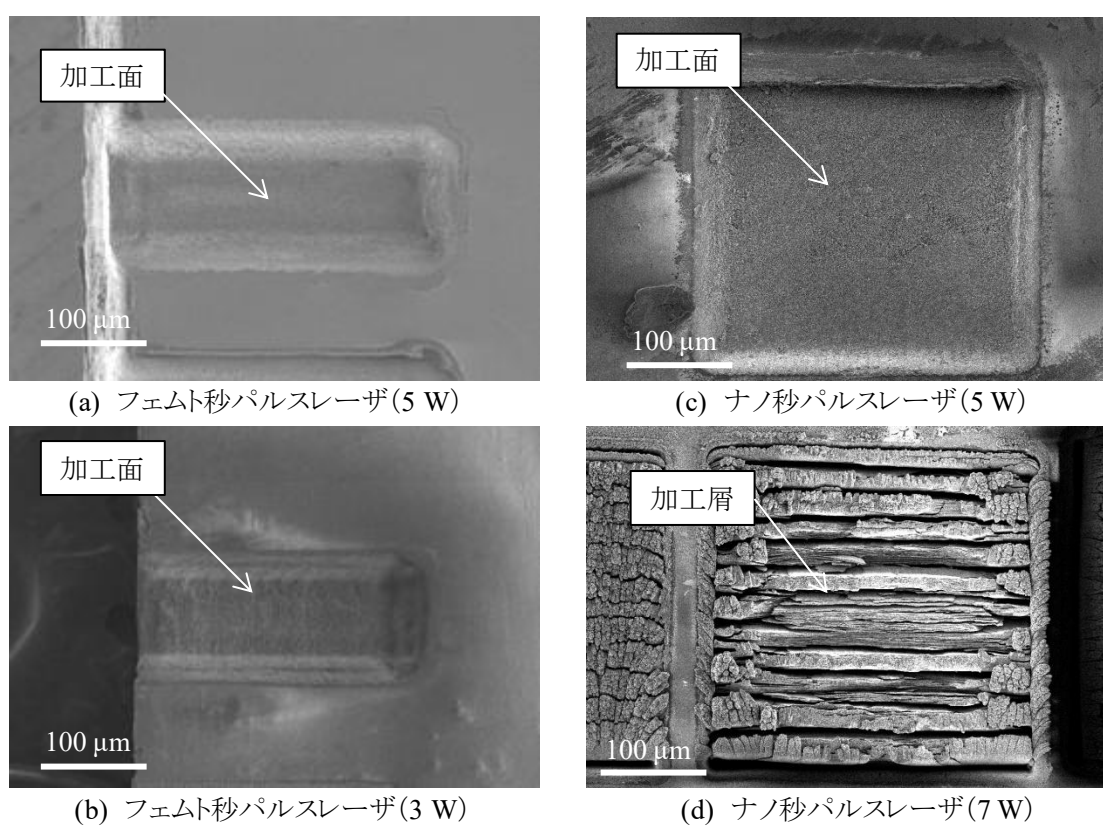


図 3-6 各レーザで加工した NPD 加工面の様子

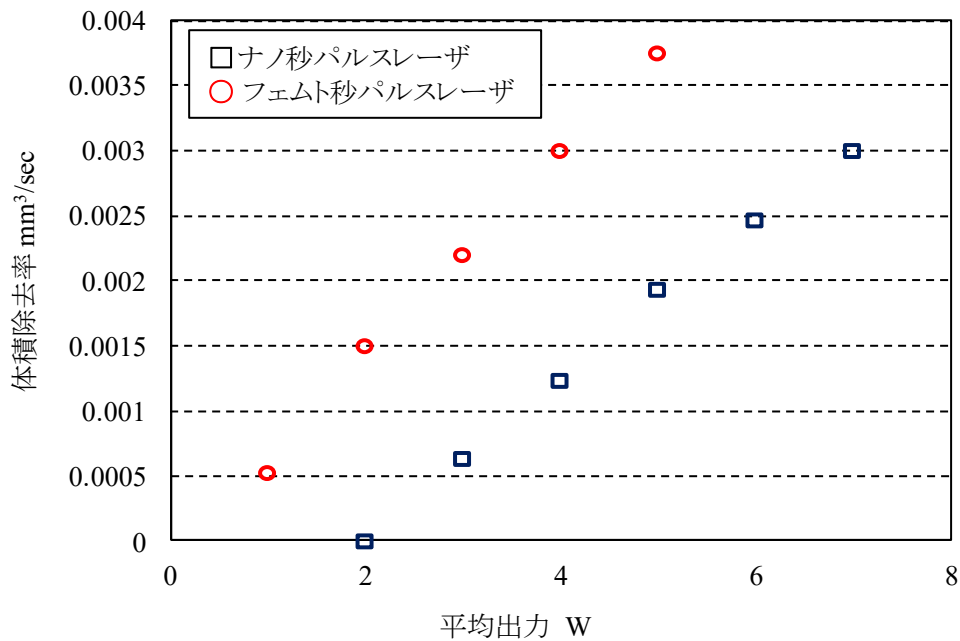


図 3-7 照射ビームの平均出力と体積除去率の関係

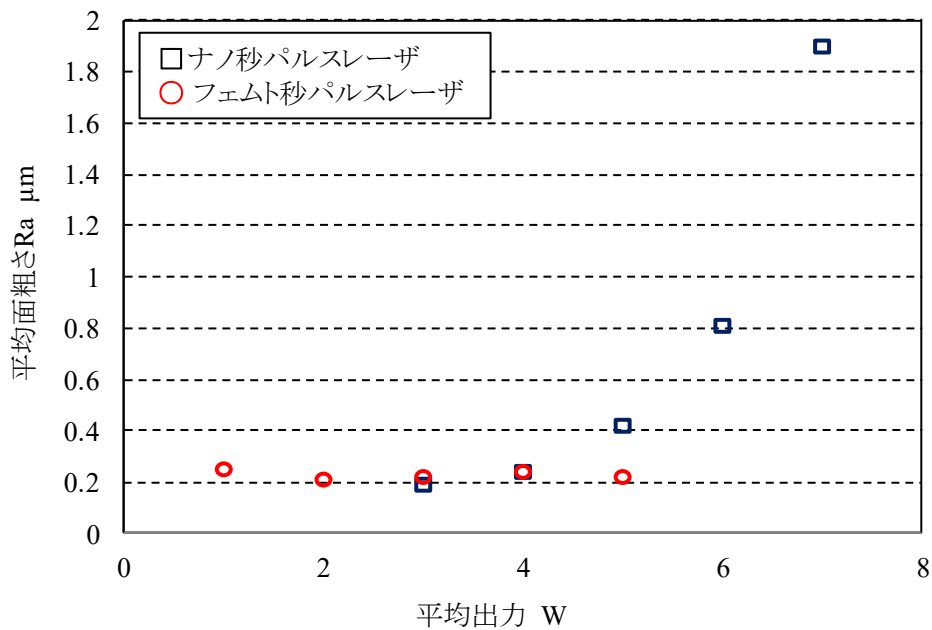


図 3-8 照射ビームの平均出力と加工面粗さの関係

ナノ秒パルスレーザーで加工した場合、加工面粗さは、平均出力の増加に伴い増大する傾向が見られた。これは照射したビームのエネルギーの増大により熱影響が大きくなることが原因として考えられる。面粗さは最良値では $0.2 \mu\text{mRa}$ を示し、粗加工の面粗さの目標値である $0.3 \mu\text{mRa}$ は達成しているが、仕上げ加工の目標値 $0.05 \mu\text{mRa}$ 以下の値は得られなかった。体積除去率はほぼ平均出力に比例して増大する傾向が見られ、加工屑が付着しない条件での最大体積除去率は 0.003

mm³/secであった。体積除去率は粗加工の目標値である 0.001 mm³/sec を達成している。ただし、体積除去率を上げるために、レーザ出力を大きくすると、面粗さも同時に増加することから、両者の目標値を同時に達成することは出来なかった。

一方、フェムト秒パルスレーザ加工の場合は、レーザ出力を上げても面粗さはほぼ一定となった。これは、仕様上今回の実験ではレーザの最大出力が 5 W であったが、これ以上の出力でも面粗さを維持したまま加工が出来る可能性を示唆している。フェムト秒パルスレーザでの加工面の面粗さの最良値は 0.15 μmRa でナノ秒パルスレーザの結果(0.2 μmRa)よりわずかに良好であったものの、垂直レーザ加工ではエッジに必要な面粗さである 0.05 μm 以下の値を得ることは出来なかった。これはレーザ出力がガウス分布をしており、ビーム中心での出力が高く、中心から遠ざかるほど出力が小さいため、照射面内でパワーが異なり、レーザ中心と外周で加工できる深さが異なり凹凸が出来ることが原因の一つとして考えられる。

体積除去率は、ナノ秒パルスレーザと同様にレーザ出力にほぼ比例して線形に増加しており、5 W で最大 0.004 mm³/sec の値を示した。これは同出力のナノ秒パルスレーザの体積除去率 0.002 mm³/sec より大きい値であった。体積除去率の目標値である 0.001 mm³/sec はフェムト、ナノ秒パルスレーザどちらも達成しているが、同パワーあたりの体積除去率はフェムト秒パルスレーザの方が大きかった。

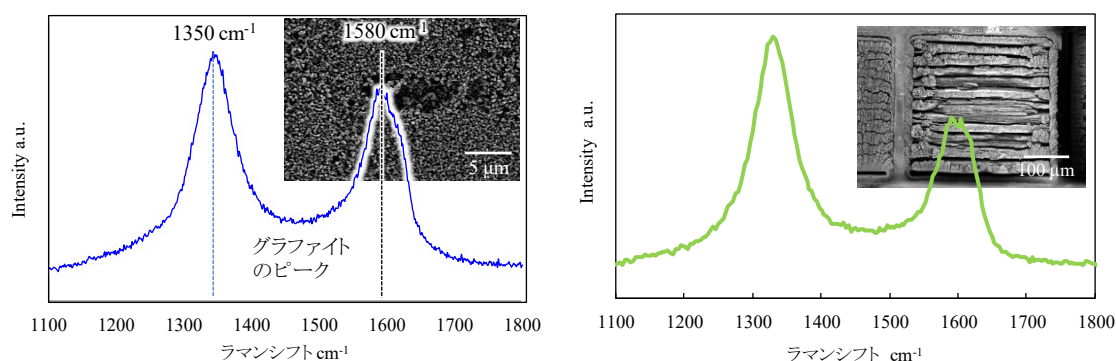
加工の安定性に着目すると、ナノ秒パルスレーザ加工において、全く同一の条件でレーザを照射しても、加工される場合と、レーザが透過され加工できない場合があり、加工が安定しないという問題があった。この現象はフェムト秒パルスレーザでの加工では見られなかった。この原因として、ナノ秒パルスレーザ加工の場合は、ピークエネルギーの低さや NPD の光吸収率の低さから、何らかの加工の起点(結晶欠陥など)が無いとレーザが NPD を透過してしまい加工ができないが、加工の起点があった場合は、その部分がレーザを吸収し昇温、グラファイト化されることでレーザの吸収率が上がり連鎖的に加工が進行するためと考えられる。実際に、加工位置に黒色のマーキングを施してレーザ照射を行うと、安定的に加工が出来ることを確認している。一方フェムト秒パルスレーザでは 1 パルスのピークエネルギーがナノ秒パルスレーザの 1000 倍以上高く、また超短時間でレーザ照射による多光子吸収の効果により、あたかも NPD が金属結晶のような振る舞いを示し、仮想的に吸収率が上昇する効果により^{40),41)}、容易に NPD の加工閾値に到達できるために加工の不安定性が無いと考えられる。

ナノ秒パルスレーザおよびフェムト秒パルスレーザで加工した NPD の表面性状を調べるために、両レーザを用いて加工した NPD の加工面に対してラマン分光法を用いて組成分析を行った。図 3-9 は両レーザで加工した表面と、前述したナノ秒パルスレーザ加工面に堆積した加工層に対しラマン分光分析を行った結果である。図 3-9(a)に示すように、ナノ秒パルスレーザ加工面にはグラファイトに対応する 1350 cm⁻¹と 1580 cm⁻¹ 付近にブロードなピークが検出された。また同様に、ナノ秒パルスレーザ加工面に堆積した加工層の成分も図 3-9(b)に示すようにグラファイトであることが確認された。これは、ナノ秒パルスレーザ加工面は、加工層が堆積していない面においても表面がグラファイト化していることを意味しており、ナノ秒パルスレーザでの加工が熱加工的であることから、加

工時の熱影響により NPD の表面層がグラファイト化したものと考えられる⁶²⁾。垂直照射によるナノ秒パルスレーザー加工面のグラファイト層の厚みを調査するために、酸による電解加工にて加工層を除去し、除去前後の加工深さを比較した結果、グラファイト層の厚みは 5 μm 程度であった。

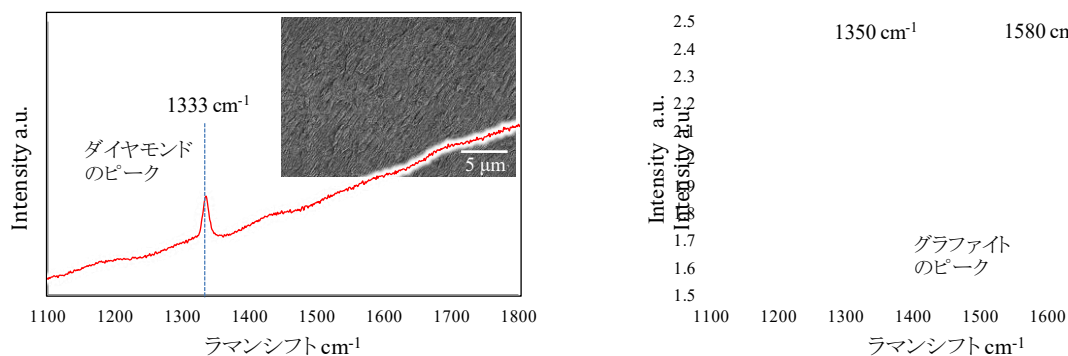
一方、図 3-9(c)に示すフェムト秒パルスレーザー加工面のラマン散乱強度にはダイヤモンドに対応する 1333 cm^{-1} 付近のシャープなピークのみが検出されており、加工面がグラファイト化していないことがわかる⁶³⁾。文献⁶⁴⁾から、ラマン分光分析に用いた波長 532 nm の励起レーザー光のグラファイトへの進入長は 50 nm 程度であるが、グラファイトのピークがほとんど観測できないことから、フェムト秒パルスレーザー加工面にグラファイト層が存在したとしても厚さ数 nm 程度であることが予想される。フェムト秒パルスレーザー加工面に対してもナノ秒パルスレーザー加工面と同様に、電解処理前後での加工深さの比較を行ったが、加工深さには変化が見られず、グラファイト化がほぼ無いことを確認している。

本節の結果より、フェムト秒パルスレーザーでは加工効率・面粗さ共に、粗加工の目標値 (0.001 mm^3/sec 以上, 0.3 μmRa 以下) を達成したが、ナノ秒パルスレーザーでは、最良値では目標値を達成しているものの、両者を同時に満たすことは困難であった。ただし、どちらのレーザーにおいても、仕上げ加工の面粗さの目標値 (0.05 μmRa 以下) は達成できなかった。またナノ秒パルスレーザーでは加工効率を上げるためにレーザー出力を増大させると面粗さの増加や加工層の付着が見られ、フェムト秒パルスレーザー加工の方が、より高い加工効率と低い面粗さを両立できることが確認された。



(a) ナノ秒パルスレーザー加工面

(b) ナノ秒パルスレーザー加工面に堆積した加工層



(c) フェムト秒パルスレーザー加工面

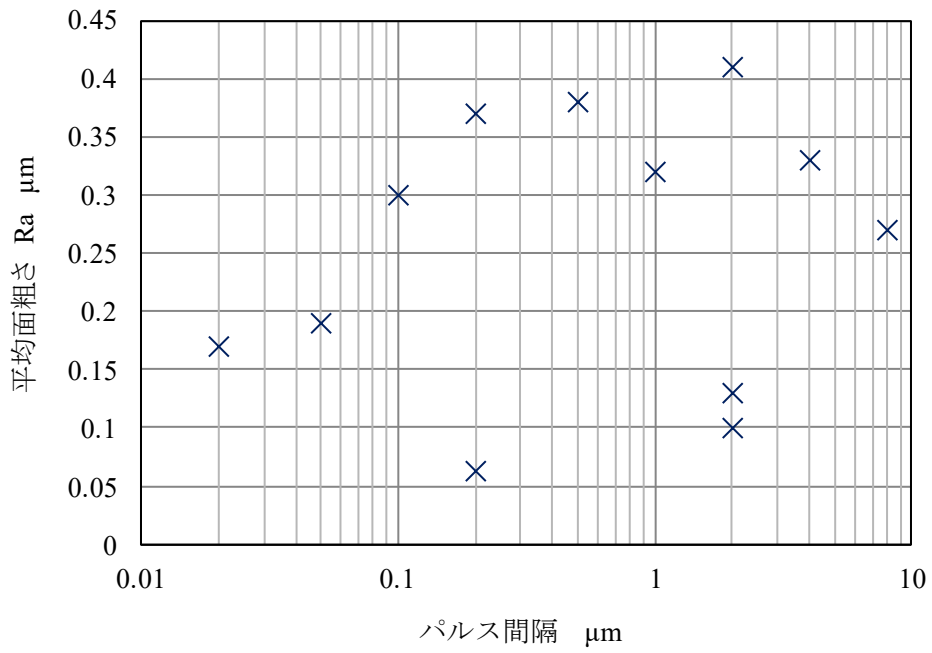
図 3-9 各レーザーでの NPD の垂直レーザー加工面のラマン分光分析結果

3-3-3 ナノ・フェムト秒パルスレーザーによる平行レーザー加工

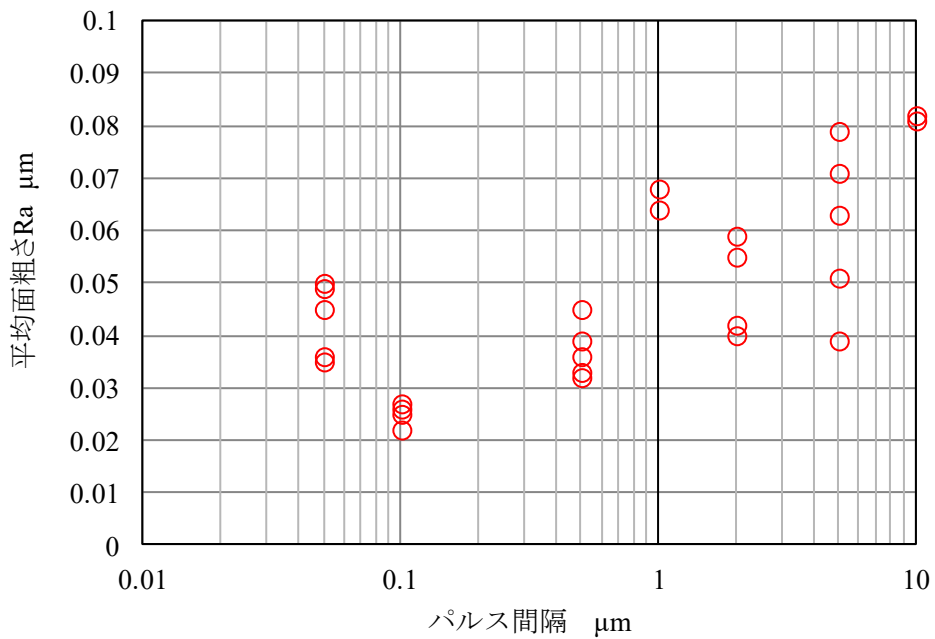
前節の結果より、垂直レーザー加工では加工効率は十分だが、工具エッジに必要となる面粗さ(0.05 μmRa 以下)を得ることは困難であった。そこで、レーザーを加工対象に平行に照射し、ビームの外周部を利用して加工する方法を試みた。レーザーのエネルギーがガウス分布を持つレーザーを使用しているため、ビーム中心から遠ざかるほどエネルギーは小さくなる。つまり、ビーム外周部での加工は、加工現象が起きる閾値のエネルギーで均一に加工されることになり、面粗さの向上が予想される⁶⁵⁾。

図 3-10 にパルス間隔と加工面の面粗さの関係と、図 3-11 にナノ・フェムト、各レーザーでの加工面の様子の SEM 観察結果と、各レーザーでの最良加工面についての 2 次元プロファイルを示す。ナノ秒パルスレーザー加工面の面粗さは最良値 0.04 μmRa で垂直照射加工の面粗さ 0.2 μmRa と比較して改善が見られた。ただし、図 3-10(a)に示す通り、面粗さのばらつきは非常に大きく、同加工条件でも大きな差が見られ、またパルス間隔と面粗さの相関性もあまり見られなかった。面粗さが大きい面では 0.4 μmRa 程度の値を示し、垂直照射の加工面と大きな差が無い場合もあった。また、加工面には、図 3-11(a)に示すようなひび割れが発生する場合があり、特にレーザーパルス間隔が小さい場合に顕著に見られたことから、レーザー加工時の熱影響が原因と考えられる。

一方、フェムト秒パルスレーザーでの加工面の面粗さは、最良値で 0.02 μmRa を示し、ナノ秒パルスレーザーの結果よりも良好な面粗さが得られた。面粗さのばらつきもナノ秒パルスレーザーと比較して小さく、0.1 μmRa 以下の値が安定的に得られている。パルス間隔と面粗さの相関としては、パルス間隔が極端に大きい(10 μm 以上)場合と、小さい場合(0.05 μm 以下)に面粗さが悪化する傾向が見られたが、影響は小さかった。パルス間隔が小さい場合に面粗さが悪化するのには、ビーム照射面積のオーバーラップ率が大きく、同位置にレーザーが照射される回数が増加することで、フェムト秒パルスレーザーの場合であっても熱影響が無視できない程に大きくなることが原因として考えられる。パルス間隔が大きい場合は、レーザーで加工される間隔が開きすぎるために、レーザーエネルギーのガウス分布の影響があらわれ、エネルギーの大小により加工量が変わることが面粗さ悪化の要因として考えられる。また、フェムト秒パルスレーザーでの加工面には図 3-11(c)にも示す通り、フェムト秒パルスレーザーによるアブレーション加工の特徴とされるナノ周期構造が確認された⁶⁶⁾⁻⁶⁸⁾。

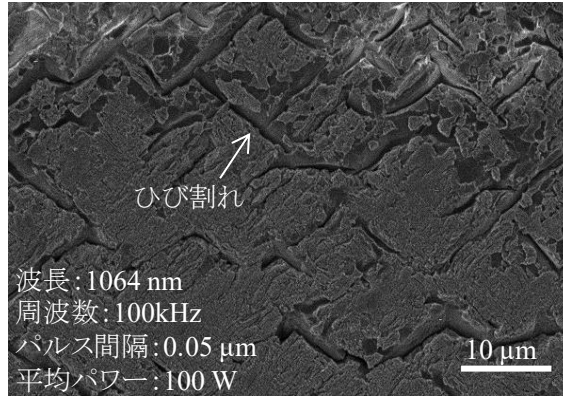


(a) ナノ秒パルスレーザーでの平行レーザー加工面

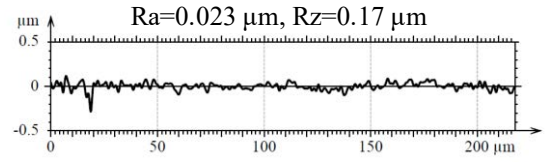
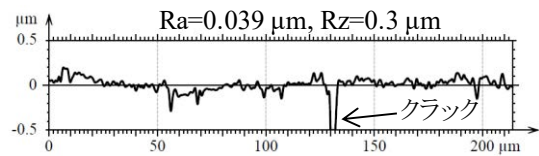
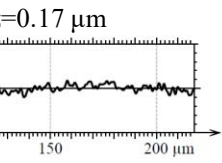
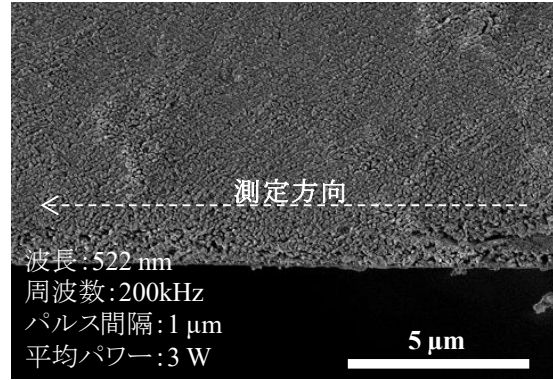
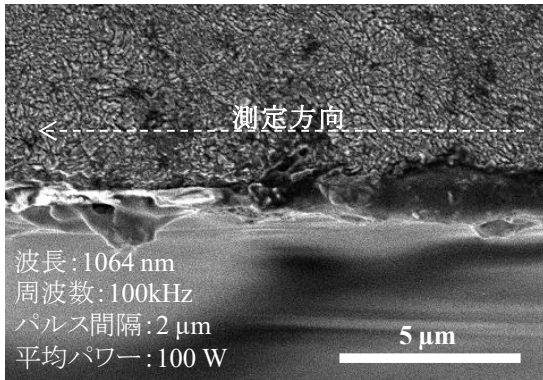


(b) フェムト秒パルスレーザーでの平行レーザー加工面

図 3-10 各レーザーでの平行レーザー加工面の面粗さとパルス間隔の関係



(a) ナノ秒パルスレーザー加工面(パルス間隔 0.05 μm)

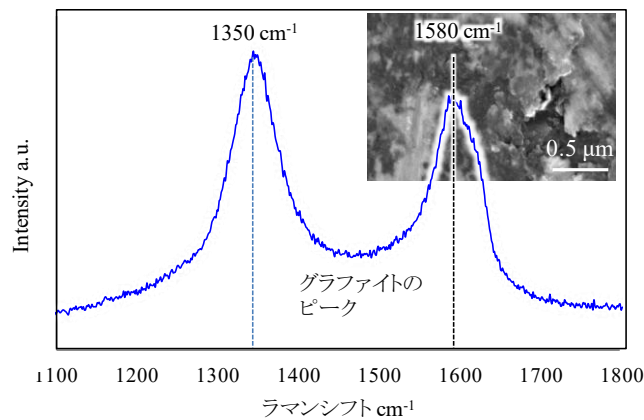


(b) ナノ秒パルスレーザー加工最良面(パルス間隔 2 μm) (c) フェムト秒パルスレーザー加工最良面

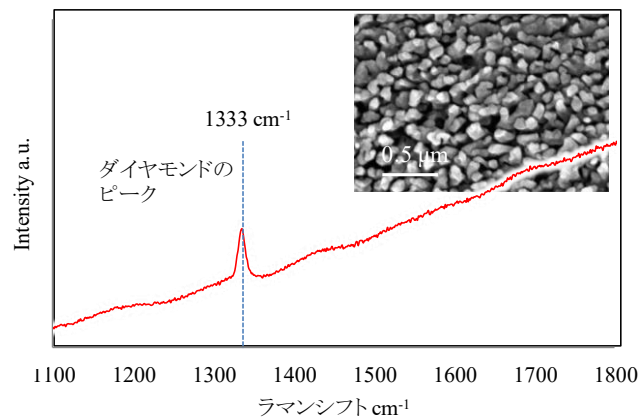
図 3-11 各レーザーでの平行レーザー加工面の SEM 画像と 2 次元プロファイル

平行レーザ加工面についても前節と同様に、NPD のグラファイト化の有無を調べるために、ラマン分光法を用いて組成分析を行った。ラマン分光での分析結果を図 3-12 に示す。ナノ秒パルスレーザ加工面には、前述の図 3-9 の垂直レーザ照射面と同様、グラファイトに対応する 1350 cm^{-1} と 1580 cm^{-1} 付近にブロードなピークが検出され、加工時の熱影響により NPD 表面層がグラファイト化していることが分かる。図 3-12(a) に示すように、加工面を SEM にて詳細に観察すると、再凝固したグラファイトが面全体に付着しているように見受けられる。フェムト秒パルスレーザ加工面についても垂直レーザ加工面と同様、ダイヤモンドに対応する 1333 cm^{-1} 付近のシャープなピークのみが検出され、加工面がグラファイト化していないことが分かる。図 3-12(b) の SEM 画像に示す通り、加工面は粒子状になっており熱影響が非常に小さいことが確認できた。

以上の結果より、ナノ秒パルスレーザにおいては、どの加工方法においてもグラファイト化を避けることが困難であり、また面粗さや体積除去率もフェムト秒パルスレーザと比較して劣ることから、ナノ秒パルスレーザをポストプロセス無しでの工具成形の用途に用いることは困難であるという結論を得た。これ以降の実験ではフェムト秒パルスレーザでの加工についてさらに詳細な検討を行った。



(a) ナノ秒パルスレーザ加工面



(b) フェムト秒パルスレーザ加工面

図 3-12 各レーザでの平行レーザ加工面のラマン分光分析結果と SEM 画像

3-3-4 フェムト秒パルスレーザー加工面の波長・偏波方向依存性

前節までの結果にて、フェムト秒パルスレーザーのみでNPD工具を製作できる可能性があることを示したが、本節では、NPDのフェムト秒パルスレーザーでの最適な加工条件をレーザーの波長、偏波方向に着目して調査した。波長は、1045 nmの赤外光、522 nmの緑色光の2通りを使用した。偏波方向は、レーザー光路中に設置した1/4波長板の角度を回転させることで変更した。

レーザー偏波方向と波長を変えて加工した面のSEM画像を図3-13に示す。図3-13(a)は直線偏波かつ赤外光での加工面、図3-13(b)は円偏波かつ赤外光での加工面である。直線偏波での加工面は顕著なナノ周期構造が見られ、面粗さも0.1 μmRa と比較的粗いが、円偏波での加工面は、ナノ周期構造が低減され面粗さが0.05 μmRa となった。ナノ周期構造は、レーザーを加工対象に照射したとき、対象の凹凸によりレーザーが散乱され、散乱光と入射光の干渉により光の強弱が生まれ、加工深さが深くなる部分と浅くなる部分ができるために生じると考えられている。また、その周期や形状は使用したレーザーの波長、偏波方向に依存することが知られている^{66)~70)}。円偏光での加工面は、直線偏光での加工時に常に同一な方向でナノ周期構造が形成されることによる凹凸の増幅が無く、様々な偏波方向で加工が行われるため、ナノ周期構造の方向もランダムになり、凹凸が低減されたものと考えられる。図3-13(c)は波長522 nm、円偏波のレーザーによる加工面である。面粗さは最良値の0.02 μmRa を示し、仕上げ加工の目標値である0.05 μmRa 以下を達成している。ナノ周期構造は波長が短いほどその周期も短くなるため^{66), 70)}、赤外光の円偏光での加工面よりも、凹凸の間隔が浅く、短くなったために面粗さが改善されたと考えられる。

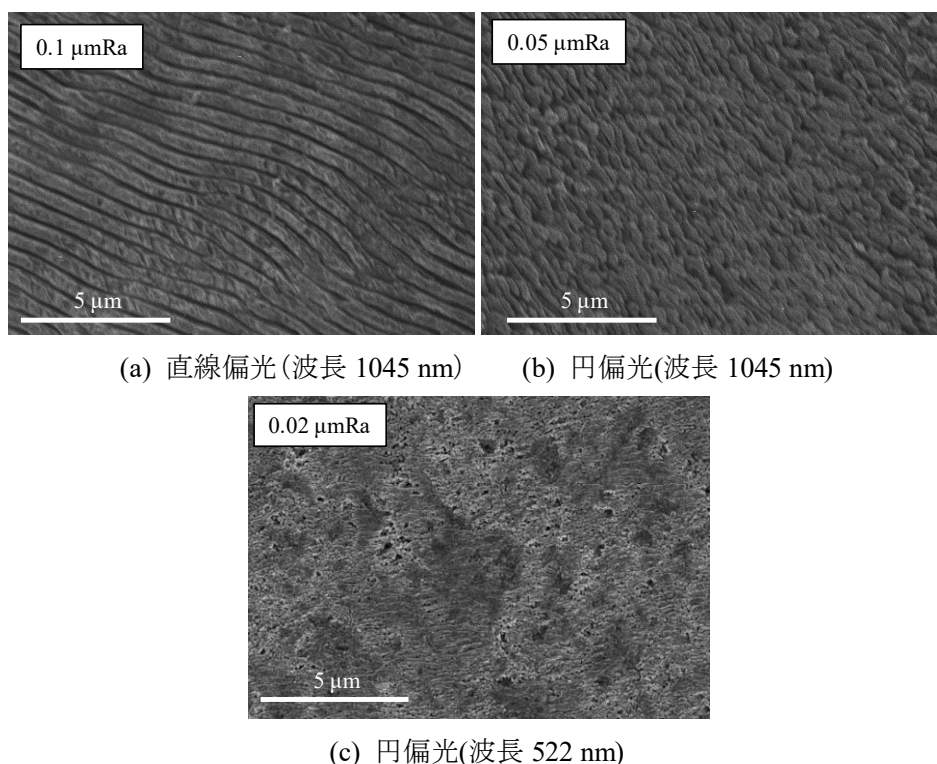


図 3-13 レーザ偏波方向と波長を変えて加工した NPD 加工面の SEM 画像

3-3-5 平行レーザ加工面の形状評価

平行レーザ加工面の形状は工具形成においても重要となるため、断面形状、レーザで形成されたエッジの鋭さの評価を行った。

平行レーザ加工面の形状をレーザ照射方向に測定した結果を図 3-14 に示す。同図に示す通り断面は直線的ではなく、10 μm 程度湾曲しており、特に加工したレーザの入射側、出射側での湾曲が大きい。また入射側と出射側のエッジ半径を測定すると、入射側が 150 μm に対して出射側が 1~4 μm と、入射側のエッジ半径が大きいことが分かった。これは加工がレーザの入射側から進行していくため、出射側と比較して入射側のレーザ照射量が多くなり余剰に加工されていることが原因と考えられる。このことは、工具のエッジをレーザで成形する場合において、エッジ部をレーザ出射側として加工を行う必要があり、レーザ照射方向が制限されることを意味する。

工具エッジの成形を想定して、平行レーザ加工にて 2 面を加工し、そのエッジ形状、エッジ半径を測定した結果を図 3-15 に示す。測定されたエッジ半径は 0.78 μm であり、目標値である 1 μm を下回ることが確認された。

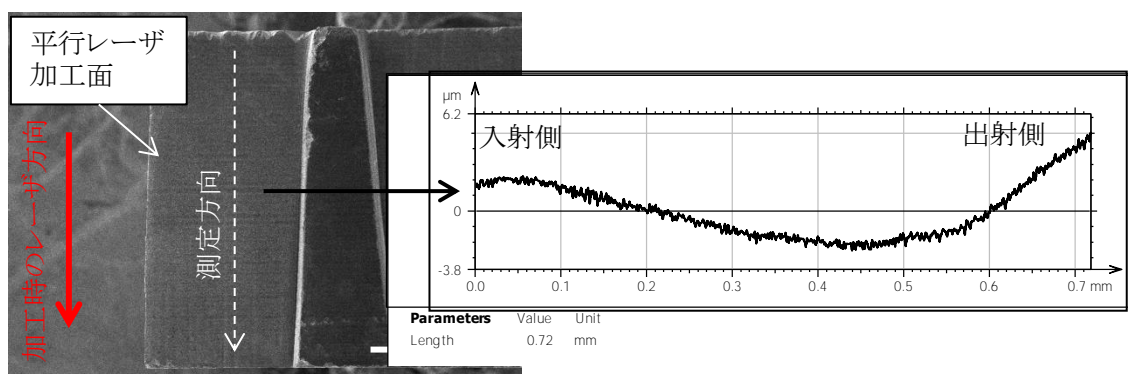


図 3-14 平行レーザ加工面の断面形状プロファイル

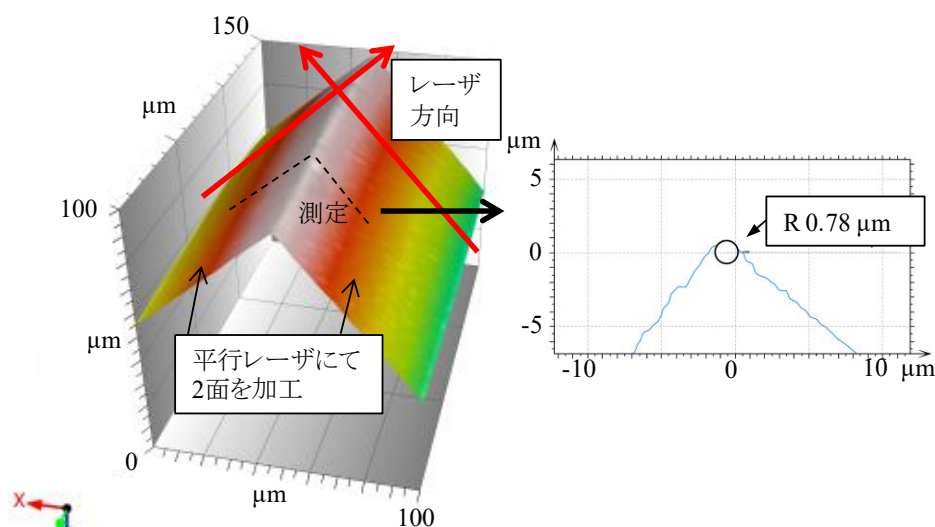


図 3-15 平行レーザで形成したエッジの 3D プロファイルとエッジ半径

3-4 結言

本章では NPD を高能率かつ高品位に加工する方法として、パルスレーザによる加工に着目しナノ秒パルスレーザ、フェムト秒パルスレーザの 2 種のパルス幅を持つレーザを用いて NPD の基礎加工実験を行った。本章で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) NPD をナノ秒パルスレーザにて加工した場合、垂直レーザ加工での体積除去率として $0.003 \text{ mm}^3/\text{s}$ の値が得られ、工具の粗成形の目標値である 0.001 mm^3 以上の値を達成できることが確認された。また、加工面粗さは垂直レーザ加工において $0.2 \text{ }\mu\text{mRa}$ 、平行レーザ加工を用いることで最良値 $0.04 \text{ }\mu\text{mRa}$ と工具エッジに要求される水準 ($0.05 \text{ }\mu\text{mRa}$ 以下) が得られた。しかし、加工面にはグラファイト化やクラックの発生が確認され、これはレーザによる工具成形後に電解加工などの除去工程を必要とし、工具製作時間が長くなる要因となり得るため、加工面の状態としては工具に必要な品質が得られるとは言い難かった。グラファイト化の要因としては、ナノ秒パルスレーザ加工がダイヤモンドの昇温による昇華現象によって行われるため、昇華温度未満の加熱されたダイヤモンドがグラファイト化し、クラックなどを発生させていることが考えられる。それに加え、NPD の透過率の高さから、レーザ光が NPD を透過し、加工が安定しない場合があり、NPD 工具を高能率・高精度かつレーザ工程のみで製作する用途には、ナノ秒パルスレーザは適さないという結論を得た。
- (2) NPD をフェムト秒パルスレーザにて加工した場合、加工効率は同レーザ出力でのナノ秒パルスレーザ加工と比較して同等以上であり、加工面の品質も、加工面に対して垂直にレーザを照射した場合に $0.15 \text{ }\mu\text{mRa}$ 、平行に照射した場合 $0.02 \text{ }\mu\text{mRa}$ と良好であった。また、加工面にはグラファイト化は観測されなかった。粗加工を垂直照射、仕上げ加工を平行照射で行うことで、レーザ工程のみで、その他の工程 (電解洗浄、研磨など) を経ずに NPD 工具を成形できる可能性があるという結論を得た。フェムト秒パルスレーザを NPD 工具製作に適用することで、現状の NPD 工具製作において大きな割合を占める研磨工程が省略できる可能性があることから、製作時間の大幅な短縮が期待できる。
- (3) NPD をフェムト秒パルスレーザにて加工を行う場合、良好な加工面品質を得るためには、ナノ周期構造を低減することが重要であることが分かった。ナノ周期構造は加工レーザの波長、偏波方向に依存することから、短波長 (波長 522 nm) かつ、円偏光で加工を行うことで面粗さが低減されることを確認した。NPD 工具のレーザ成形時においても、上記のレーザ条件を使用することで加工面品質の向上が期待される。

- (4) NPD 工具製作のために必要となる目標値と実際の加工結果を表 3-6 にまとめる。表の通り、フェムト秒パルスレーザーを用いることで、工具成形に必要な要件を全て達成できることが確認された。

表 3-6 レーザ工具成形における達成目標値と各レーザー加工方法での実測値

	達成目標値	実測値	
		ナノ秒パルスレーザー	フェムト秒パルスレーザー
加工効率	粗加工:>0.001 mm ³ /sec 仕上げ加工:不問	0.003 mm ³ /sec	0.004 mm ³ /sec
面粗さ Ra	粗加工:<0.3 μm 仕上げ:<0.05 μm	垂直レーザー:0.2 μm 平行レーザー:0.04 μm	垂直レーザー:0.15 μm 平行レーザー:0.02 μm
エッジ半径	<1μm	未測定	0.8μm
その他	ポストプロセス不要	グラファイト化により除去工程が必要	グラファイト化無し 加工層の再付着無し

- (5) 実験結果より、NPD の工具成形に使用するレーザー条件を表 3-7 のように設定する。

表 3-7 NPD のレーザー加工条件

パルス幅	350 fs
平均エネルギー	<3 W
パルスエネルギー	<15 μJ
レーザー波長	522 nm
パルス繰り返し周波数	200 kHz
偏波方向	円偏光
レーザーパルス間隔 (レーザー送り速度)	0.5~2 μm (100~400 mm/sec)
ビーム径	20 μm

第4章 フェムト秒パルスレーザー搭載 5 軸加工システムの開発

4-1 序言

前章の実験結果からフェムト秒パルスレーザーを NPD の加工に用いることで、NPD 工具成形に必要な品質を維持しつつ、かつ高能率で加工を行える可能性があることが確認された。工具成形に必要な仕様を持つ加工機は一般的ではなかったため、工具成形用のフェムト秒パルスレーザー搭載の 5 軸加工システムの開発を行った。5 軸加工システムの開発は第 3 章で使用したナノ秒パルスレーザー搭載加工機 AP3L を更に改造することで行った。第 3 章の結果を考慮すると、NPD 切削回転工具をフェムト秒パルスファイバレーザーにより製作するシステムを構築するためには、表 4-1 に示すような、4 つの技術的な要素が必要になる。本章ではフェムト秒パルスレーザー搭載 5 軸加工システムの開発について述べる。

- (1) 機械的な要素: 5 軸加工機とガルバノスキャナ
- (2) レーザ源と光学系: フェムト秒パルスファイバレーザー, 光学システム
- (3) レーザ加工: 加工方法と加工条件
- (4) 制御システム: 5 軸加工機, ガルバノスキャナとレーザーの最適な制御技術

表 4-1 フェムト秒パルスレーザー搭載 5 軸加工システムに必要な要素

機械的な要素	5 軸加工機	工具の位置決め
	ガルバノスキャナ	レーザーの高速走査
レーザー発振器, 光学系	フェムト秒パルスファイバレーザー	
	加工に最適化された光学系	SHG デバイス
加工方法と加工条件	加工方法	旋削, 垂直レーザー加工, 平行レーザー加工, 工具エッジのチャンファリング
	最適化された加工条件	焦点位置, パルス間隔, 繰返し周波数, レーザ出力
制御システム	5 軸加工機の制御	
	ガルバノスキャナの制御	
	全体の制御システム	

4-2 加工システムの構成

4-2-1 レーザ発振器・光学系

フェムト秒パルスレーザー搭載5軸加工システムを構築するにあたり、まずNPD工具のレーザー加工に必要な加工条件を満たすレーザー発振器、レーザーのパラメータを制御するための光学系が必要となる。3章で述べたNPDのレーザー加工に必要な条件を達成するために必要となる光学機器の一覧を表4-2に示す。

レーザー発振器としては、前述の3章で使用した発振器にて十分な加工性能を達成できることが確認されたため、3章で使用した発振器と同仕様のものを採用した。採用したフェムト秒パルスレーザー発振器の外観を図に、仕様を表に示す。パルス幅は350 fs、波長は1045 nm、最大平均出力10 W、繰返し周波数200 kHz、パルスエネルギーが最大50 μJの仕様となっている。

SHG (Second Harmonic Generation) デバイスはレーザー波長の変換に使用される。前述の通り、面粗さを小さくするためには、ナノ周期構造の低減の観点から、赤外レーザー(波長1045 nm)を使用するよりも緑色レーザー(波長522 nm)を使用することが有効であった。発振器から発生するレーザーの波長は1045 nmに固定されているため、外部で波長を元の波長から522 nmに半減させる素子であるSHGデバイスが必要となる。SHGデバイスは、非線形光学結晶であるLBO (Lithium Triborate) 結晶を温度制御されたオープンの中に配置した構造であり、LBO結晶とレーザー光の相互作用を利用して、元となった光の半分の波長をもつ光を発生させることができる⁷⁾。LBO結晶は、温度により特性が大きく変化するため、オープンにより精密に温度制御される必要がある。採用したSHGデバイスの外観を図4-1、仕様を表4-3に示す。

表 4-2 フェムト秒パルスレーザー加工システムに必要な光学機器

名称	用途
フェムト秒パルスレーザー発振器	フェムト秒パルスレーザーの発振
モータ制御アッテネータ	レーザー出力の制御
SHG デバイス	レーザー波長の 1045 nm から 522 nm への変換
1/4 波長板	偏波方向の制御
高速シャッター	レーザーの ON/OFF
光学テーブル	光学機器の振動の抑制



図 4-1 SHG デバイスの外観

表 4-3 SHG デバイス仕様

パーツ	メーカー
LBO Crystal ・厚み:3 mm, 面積: 6 mm x 6 mm ・Cut angles: $\theta=90^\circ$, $\Phi=0^\circ$ ・1045 nm to 522 nm conversion (NCPM) ・AR coating: 1045 nm & 522 nm ・変換効率:50%(最大時)	Newlight Photonics
Oven & Precision Temperature Controller	Newlight Photonics
2" Kinetic Mirror Mount (for oven)	Thorlabs KM200

モータ制御アッテネータはレーザ出力調整のために使用される。レーザ発振器そのものはレーザ出力が一定であるため、加工条件を設定する際に、外部コントローラからの指令に応じてレーザ出力を任意に変えられる必要がある。そこでモータ制御により高精度に出力を変えられる機構である偏光キュータイプのモータ制御アッテネータを採用した。偏光キュータイプのモータ制御アッテネータは、p 偏光を透過し、s 偏光を反射する偏光ビームスプリッタの手前に $\lambda/2$ 板を配置した構成となっている。レーザ出力の調整は、 $\lambda/2$ 板の角度を回転させることにより、レーザの偏光方向を変え、偏光ビームスプリッタを透過するレーザの割合を変化させることで行う。 $\lambda/2$ 板の回転機構に自動ステージを組み込むことで、ステージコントローラを介して PC による光量の外部制御が可能となる。表 4-4 に実際に採用したアッテネータの仕様を示す。

表 4-4 モータ制御アッテネータの仕様

メーカー	EKSM OPTICS
型式	990-0070-1030BM (Wavelength 1010 – 1050 nm)
コントローラ	980-0841
電源供給	PCS30U-120V

$\lambda/4$ 波長板は偏波方向を変換するために使用される。レーザ発振器本体の偏光は直線偏光であるが、3 章の加工結果より、直線偏光で加工された面には周期的な模様が生成される。この現象を低減させるため、直線偏光から円偏光または楕円偏光に偏波方向を変える必要がある。偏波方向は $\lambda/4$ 波長板の角度を変えることで自由に回転させることができ、直線偏光のレーザを $\lambda/4$ 波長板高速軸から 45° の方向で入射させることで円偏光に変換することが可能となる⁷²⁾。偏波方向は基本的に円偏光を使用するため、外部制御などは設けなかった。

高速シャッタはガルバノスキャナの高速走査に対応したレーザの ON/OFF の切り替えや加工開始, 終了時のレーザの ON/OFF 制御に必要となる. 高速にレーザビームを ON/OFF するために, 高速メカニカルシャッターを採用した. 構成部品を表 4-5 に示す. シャッタは, シャッタユニットとコントローラで構成され, 制御装置からの信号で ON/OFF する.

表 4-5 高速シャッタ構成部品

メーカー	Uniblitz
シャッタ	LS2S2T0
ケーブル	510A
ドライバ	VCM-D1

光学定盤は, 設置したレーザ発振器や光学機器を床の振動から分離し, 振動による光路のずれを抑制するために使用される. 採用した光学定盤の仕様を表 4-6 に示す.

表 4-6 光学定盤の仕様

メーカー	Newport
型式	M-VIS3648-PG2-325A
寸法	900 x 1200 x 59 mm
固定用ネジ穴サイズ	M6 -1.0
ネジ穴の間隔	25 mm grid
耐荷重	590 kg
タイプ	Isolated workstation

4-2-2 5軸加工システムの機械的な構成

レーザでの工具成形工程は、基本的な旋削加工、垂直レーザ加工、平行レーザ加工の3つの工程と、平行レーザ加工の一種ではあるが、加工パスが複雑になると考えられる工具エッジの面取りを行うチャンファ加工の計4つの加工方法の組み合わせで成り立つと考え、加工機はこれらの加工方法に適応できる構成とした。各加工方法の模式図を図4-2に示す。まず各加工方法について以下に簡単に整理する。

旋削加工は、図4-2に示すように切削加工の旋削と同様の動作の加工方法であり、回転する加工対象にレーザを照射し、基本的には回転対象の形状を成形する加工である。この加工方法は工具ブランクの円筒形状への加工、半球形状の加工などに適用される。

垂直レーザ加工は、加工面に対してレーザビームを垂直に照射する加工である。高能率に加工できるが、面粗さは最良で $0.2 \mu\text{mRa}$ 程度となる。NPD工具のエッジ部以外の形状の加工に適用される。

平行レーザ加工は、光軸と加工面が平行な加工で、 $0.02 \mu\text{mRa}$ まで面粗さを小さくすることができる。光軸の出射側では、シャープなエッジを生成することが可能となり、工具エッジの生成に適した加工方法である。ただしレーザ外周部のみで加工を行うため、加工効率は低下する。

チャンファ加工は、工具がシャープなエッジを持つ場合、脆性材料を加工するときに欠けやすいため、エッジを落とすことで刃先強度を向上させるために行われる。また、チャンファにより実効的なすくい角が負になり、すくい角が0や正の時と比較して、延性モード加工を実現しやすくなるという利点がある。一般的な市販NPD工具の場合には、図4-3で示されるように $5\sim 10 \mu\text{m}$ 程度の長さで 45° にエッジが削られる。逃げ面と削り落とされたコーナ部分の交点が工具エッジとなるため、この加工は工具の精度を決める重要な加工であり、形状精度とともに低い面粗さが要求される。この工程も平行レーザ加工で行われるが、通常の平行レーザ加工と異なり、5軸同時制御での加工が必要となるため、チャンファ加工として区別した。

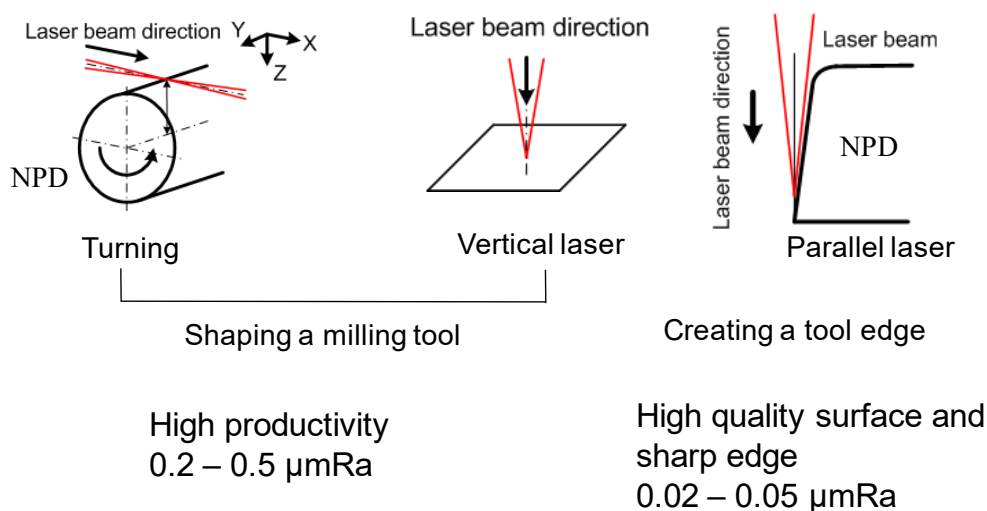


図4-2 基本的な3つのレーザ加工方法

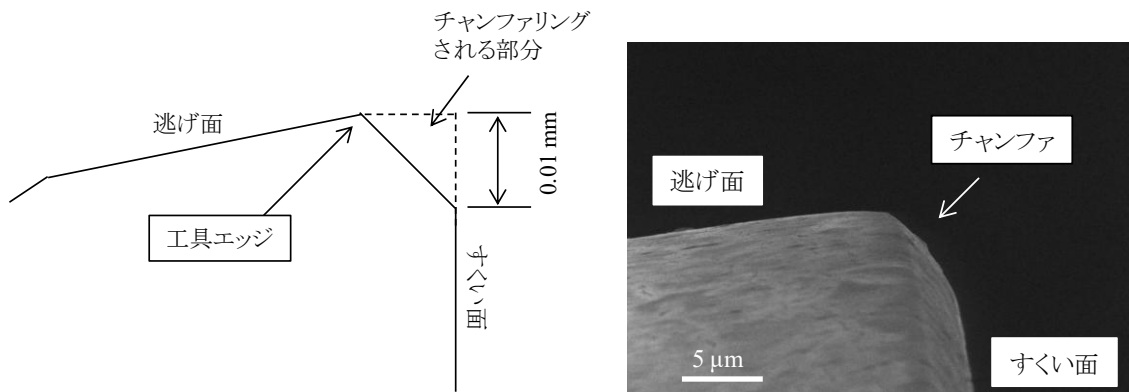


図 4-3 工具のチャンファの模式図と市販 NPD ボールエンドミルのエッジ部の SEM 画像

NPD ボールエンドミル製作工程は、大きく7工程で構成されることが想定され、基本加工タイプは、前述の旋削加工、垂直レーザ加工、平行レーザ加工の3タイプと工具エッジ部のチャンファ加工である。表 4-7 に想定される加工工程をまとめる。加工機はこれらの工程を実現できる構成とする必要がある。以下に具体的な加工機の構成について述べる。

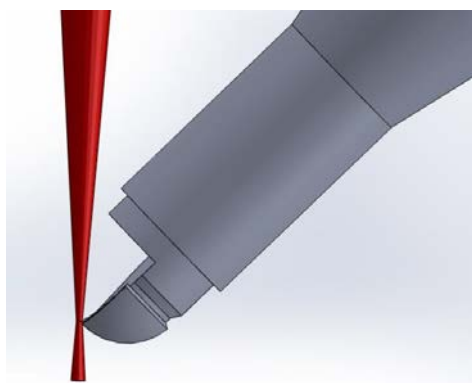
まず、レーザ光の照射方向は-Z 方向とした。フェムト秒パルスレーザを光ファイバにて伝送することは、そのパルスエネルギーの高さから困難なため、レーザ光はミラーにより伝送される必要がある。ミラーを用いる場合、レーザを導入する軸は1軸のみの動作である必要があることから、AP3L の場合には Z 軸方向からのレーザ供給とした。それに伴い、回転軸の構成は、工具主軸を割り出す B 軸とレーザビームと平行な回転軸となる工具主軸(C 軸)となる。

工具を製作するための垂直レーザ加工と平行レーザ加工の工程は、5 軸で位置・角度を割り出し、ガルバノスキャナを用いたレーザ走査により加工を行うが、工具エッジのチャンファリングの場合のみ、同時 5 軸の動作が必要になる。5 軸加工機の加工位置での接線速度は非常に遅くなるため、レーザビームの熱的な影響を少なくするため、ビームは常に円運動をするようにして、一点に留らないようにすることが必要になる。レーザビームは、エッジをシャープに出すために、図 4-4 のような方向から照射する必要がある。その動作を実現するために B 軸の動作範囲が限定される。B 軸の回転範囲は、垂直状態を 0°として、+140°、-95°の動作範囲が必要となる。+140°が必要となるのは、工具エッジのチャンファ加工時である。この動作時に、軸の干渉が発生しないように各機構を配置する必要がある。

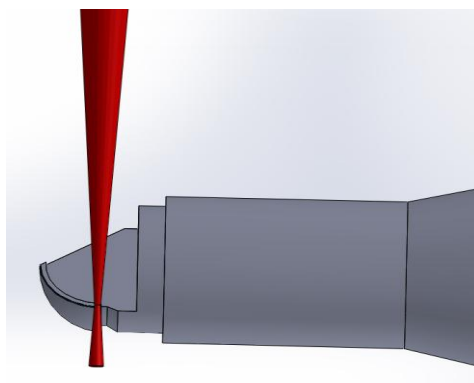
工具割り出し軸(B 軸)の先端が C 軸の回転中心にくるため、B 軸の重心位置が C 軸の回転中心から大きく離れ、B 軸を±90 の位置に設定した際に、最大のトルクが必要となる。通常、反対側にバランスウェイトを設置するが、バランスウェイトが Z 軸またはガルバノスキャナと干渉することが考えられたため、バランスウェイトを用いず、大きいトルクを持つ回転軸を選定した。

表 4-7 ボールエンドミルの加工工程

工程	加工タイプ
円筒加工	旋削加工
半円筒の除去加工	垂直加工(粗加工) 平行加工(仕上げ加工)
四半球の加工	旋削加工
片刃の除去	垂直加工
逃げ面加工	平行加工
エッジのチャンファ加工	チャンファ加工
回転時突出部の除去	垂直加工



B 軸角度 135°



B 軸角度 90°

図 4-4 チャンファ加工時のレーザ照射方向の模式図

4-2-3 ガルバノスキャナ

NPD 工具を高能率に成形するためには、ビームの高速移動を実現するガルバノスキャナが必須となる。3 章で述べたように、フェムト秒パルスレーザーで NPD を加工した結果、パルス間隔が 0.01 μm 以下の極端に短い場合は面粗さが増加、またパルス間隔が 5 μm 以上の場合においても面粗さが増加する。加工効率は、一貫してパルス間隔と比例関係にあり、高能率加工を行うためにはパルス間隔を大きくする方が有利である。実際の加工では、安定した面粗さが得られ、かつ加工効率の高いパルス間隔は 1 μm 前後であった。レーザーの繰り返し周波数は 200 kHz 固定であるため、レーザーピッチ 1 μm を実現するために、200 mm/sec (12,000 mm/min) のレーザー走査速度が必要となる。小径工具成形時のレーザー走査範囲は 1 mm 以下が想定されるが、1 mm 以下の距離で、200 mm/sec 前後の速度を軸移動で実現することは困難である。従って、加工過程はガルバノスキャナで実現することになり、5 軸加工機は、ほとんどの場合、位置決めで使用される。ビーム位置の XY 軸方向への移動は 2 軸のガルバノスキャナを使用し、Z 軸は、レンズ位置をリニアモータで動かし、焦点位置を変更する。システムの構成要素を表 4-8 に示す。表 4-9、表 4-10 に採用したガルバノスキャナの仕様を示す。

表 4-8 ガルバノスキャナの構成要素

メーカー	SCANLAB
XY 軸スキャナ型式	intelliSCAN 14
Z 軸スキャナ型式	VarioSCAN20i
コントローラ	RTC 5
制御ソフト	laserDESK

表 4-9 ガルバノスキャナ(intelliSCAN14)の仕様

アパーチャ径	14 mm
チューニング方式	Sharp Edge
走査時の誤差	0.15 msec
走査速度 マーキング時	2.0 m/sec
位置決め時	5.0 m/sec
ステップ応答時間	0.45 msec
角度のドリフト量 8 時間でのドリフト (30 分間暖気運転後) オフセット	< 30 μ rad
ゲイン	< 30 ppmd
24 時間でのドリフト(3 時間暖気運転後) オフセット	< 30 μ rad
ゲイン	< 40 ppm
温度による角度ドリフト量 オフセット	< 15 μ rad/K
ゲイン	< 8 ppm/K
角度再現性	< 0.4 μ rad/K
位置決め分解能	20 bit

表 4-10 Z 軸スキャナ(varioSCAN20i)の仕様

描画サイズ	(110 x 100) mm ²
Z 方向焦点移動量	\pm 32 mm
焦点でのビーム径	\pm 35 μ m
ビーム拡大ファクター	2.8
平均フォーカスシフト	16 mm/min
最大レーザパワー	60 W
最大レンズ移動量	\pm 2 mm
トラッキングエラー	0.55 msec
移動速度	< 280 mm/sec
再現性	< 0.5 μ m
ノンリニアリティ	0.05 % FS

4-2-4 フェムト秒パルスレーザー搭載5軸システムの構築

前節までに述べた光学系, 5軸加工機を組み合わせることで, フェムト秒パルスレーザー搭載5軸加工システムを構築した. 加工に用いるレーザーの波長は元のレーザー発振器の波長である 1045 nm の赤外光と, SHG デバイスにより波長を半分に変換した 522 nm の緑色光を切り替えられる仕様とした.

図 4-5 に加工システムの模式図, 図 4-6 に実際に構築した加工システムの外観を示す. レーザー発振器から出射したレーザーは, レーザー出力を制御するモータ制御アッテネータ, レーザーの ON/OFF を制御する高速シャッタを通過した後, レーザーの元の波長である赤外光を使用する場合は, フリッパーミラーを使用することで SHG デバイスを通過させずに偏光調整のための $\lambda/4$ 板を通り, 5軸加工機内に導入される. 緑色光を使用する場合は, フリッパーミラーを使用しないことで, SHG デバイスを通過させ, 波長を変換した後に $\lambda/4$ 板を通り, 5軸加工機内に導入される. レーザー発振器と光学機器は床の振動から分離するため, 除振機能を持った光学定盤上に配置した. 5軸加工機 AP3L に入射したレーザーはミラーを介して Z 軸と平行に導かれ, 更にミラーを介してガルバノスキャナユニットに導入される. 最終的にガルバノスキャナ内のミラーに反射されたレーザーは焦点距離 100 mm の $f\theta$ レンズを通り加工対象に集光される構成とした. ガルバノスキャナにレーザーを導入する反射ミラーとガルバノスキャナは加工機の Z 軸上に配置されているため, Z 軸を動作させることで加工対象と $f\theta$ レンズの距離(焦点位置)を変更することが出来る. レーザーパワーは, ガルバノスキャナのコントローラにより制御され, シャッタの ON/OFF は 5軸加工機の CNC とガルバノスキャナのコントローラの両方から制御できる構成とした.

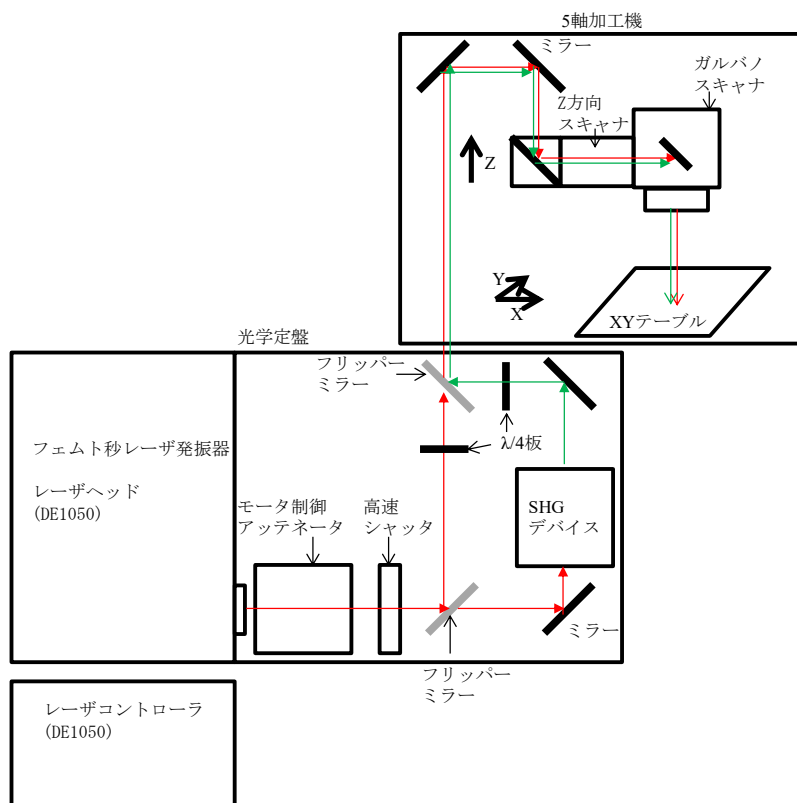


図 4-5 フェムト秒パルスレーザー搭載工具加工システムの模式図

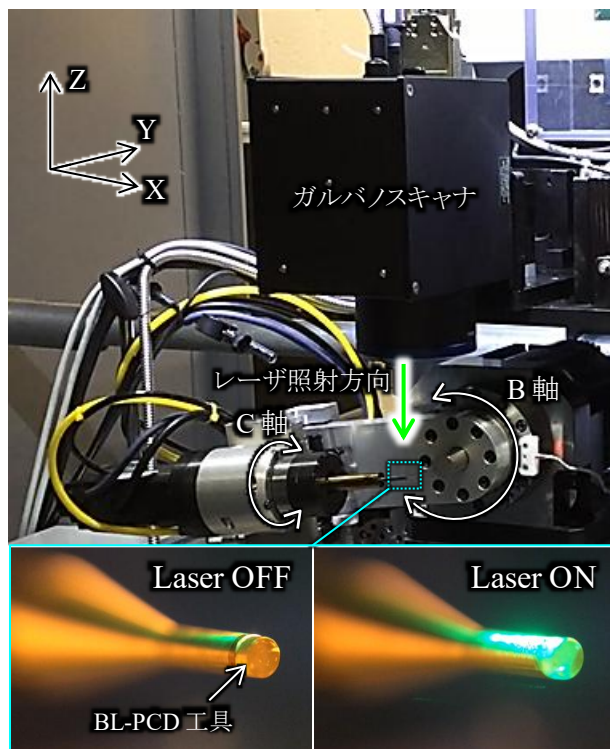
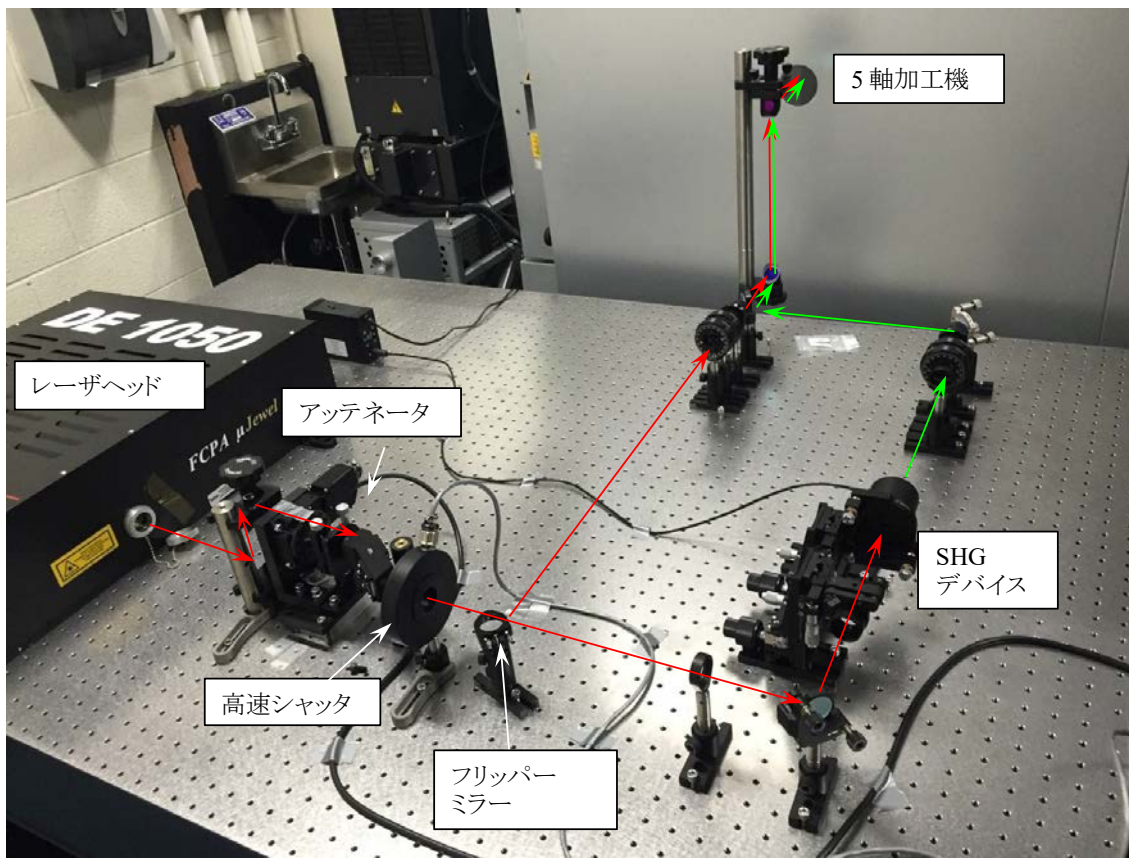


図 4-6 構築したフェムト秒パルスレーザー加工システム

4-3 フェムト秒パルスレーザー加工システムの評価

4-3-1 5軸加工機の精度評価

構築したフェムト秒パルスレーザー加工システムの評価として、加工機の静的精度の評価を行った。加工機の水準は X 方向で 0.007 mm/m、Y 方向で 0.010 mm/m に調整した。

まず、加工機のテーブルにおける XYZ 方向の直進度、直角度を測定した。測定はワイヤ放電加工機用の直角ジグを用いた。測定長さは 50 mm とした。測定方向の模式図を図 4-7 に、測定結果を表 4-11 に示す。いずれの値も 0.001 mm 程度に収まり、工具の加工にも問題無い値であることが確認された。

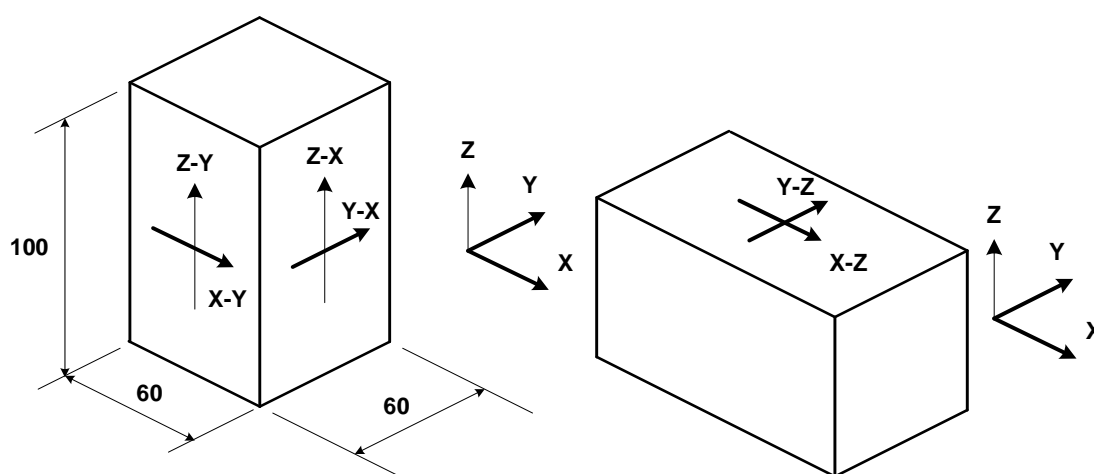


図 4-7 直進度・直角度の測定方向

表 4-11 各測定方向における直進度・直角度の測定結果

測定方向	最大値
X-Z	0
Y-Z	0.001 mm
Y-X	基準面
Z-X	0.001 mm
Z-Y	-0.001 mm
X-Y	0.001 mm

次にB軸の評価を行った。図4-8に評価方法の模式図を、図4-9に実際に測定を行った際の様子を示す。測定には電子マイクロメータを用いた。図4-8のようにB軸が0°の位置で工具ホルダをZ+方向に測定した際に、直進度が0となるように調整した後に、B軸を90°に設定し、工具ホルダのX+方向への直進度を測定することでB軸の角度設定の精度評価を行った。測定長はどちらも30mmとした。測定結果としては30mmの長さに対して+0.01mm、角度にして約0.019°の誤差があることが分かった。

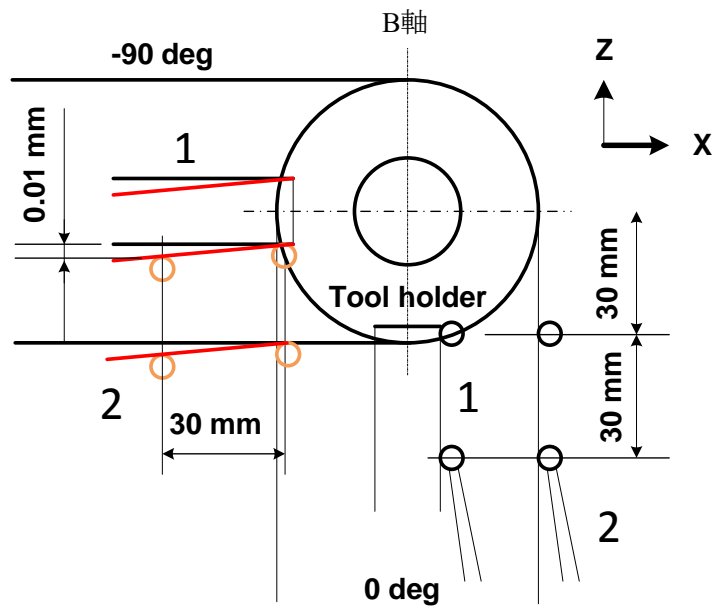
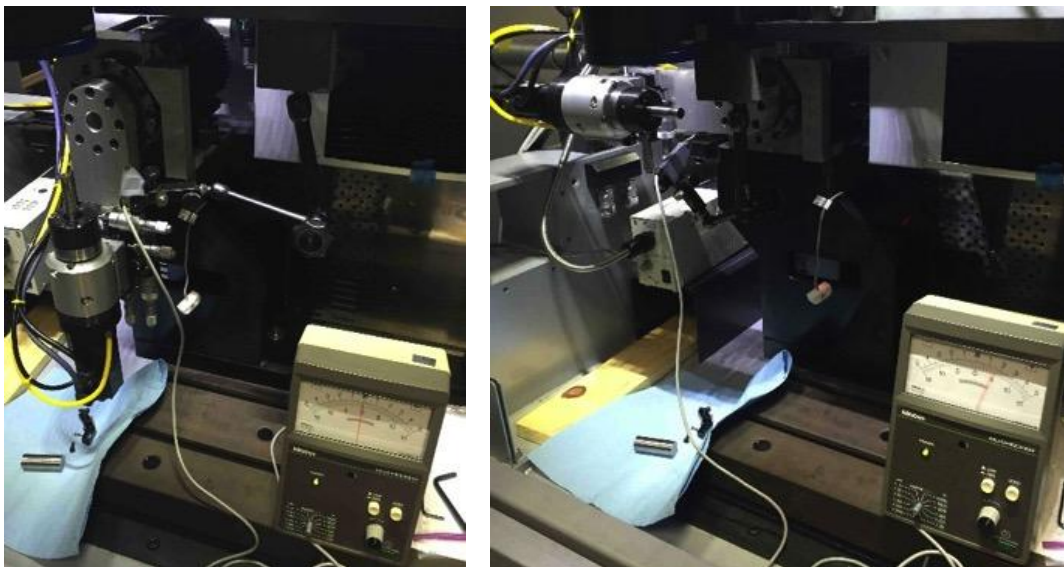


図4-8 B軸精度評価方法の模式図



(a) B軸 0°設定時

(b) B軸 90°設定時

図4-9 B軸精度評価の様子

B 軸の振れ量を B 軸の内部のベアリングホルダと、主轴のルータの外側の 2 か所の位置で測定した。B 軸を 1 回転させた際の振れ量を測定した結果を図 4-10 に、実際の測定時の様子を図 4-11 に示す。振れ量は最大で 15 μm と測定され、比較的大きい値を示した。

B 軸の角度誤差と振れ量が大きい原因として、B 軸のベアリングの与圧が低いこと、B 軸の組み上げ時に欠陥があったこと、C 軸は工具の位置を B 軸中心に正確に調整する必要があることから、マイクロメータを用いた微調整用ホルダを用いており、C 軸の位置調整用ホルダの剛性不足が考えられる。

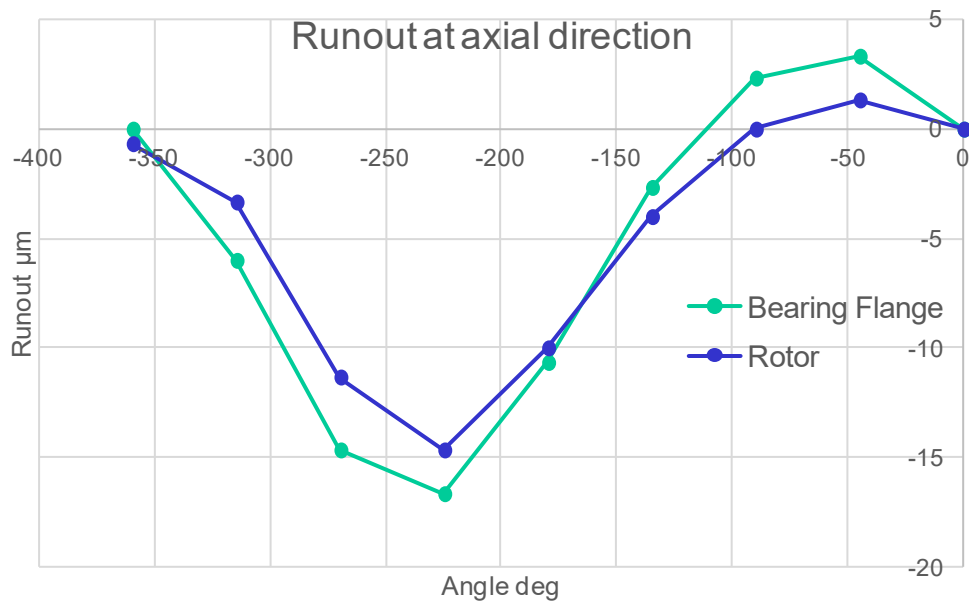


図 4-10 B 軸振れ量の回転角度との関係

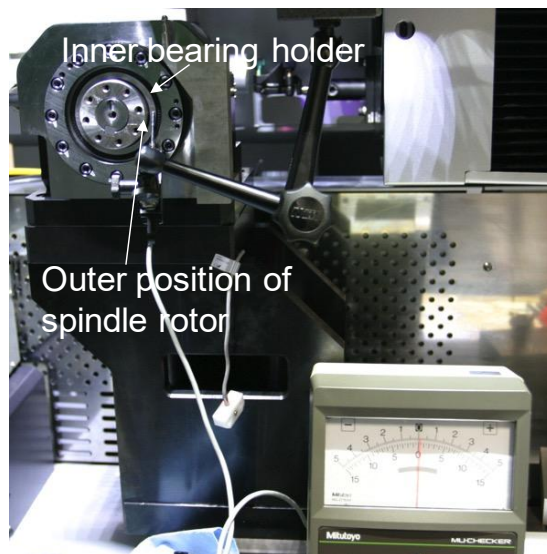


図 4-11 B 軸振れ量測定の様子

上記の誤差の問題の改善策として、B軸の与圧を上げるため、B軸ベアリングケースのドライブシャフトの厚みを薄くした後、B軸の再組み上げを行った。C軸位置調整用ホルダの剛性不足の対策としては、図4-12で示すような、C軸の位置を調整した後に、ネジによって固定する追加パーツを製作した。

これらの対策により、前述の角度誤差が 0.19° から 0.1° まで、B軸の振れ量が $15\mu\text{m}$ から $4\mu\text{m}$ まで低減し、許容できる程度の値に収まったことを確認した。

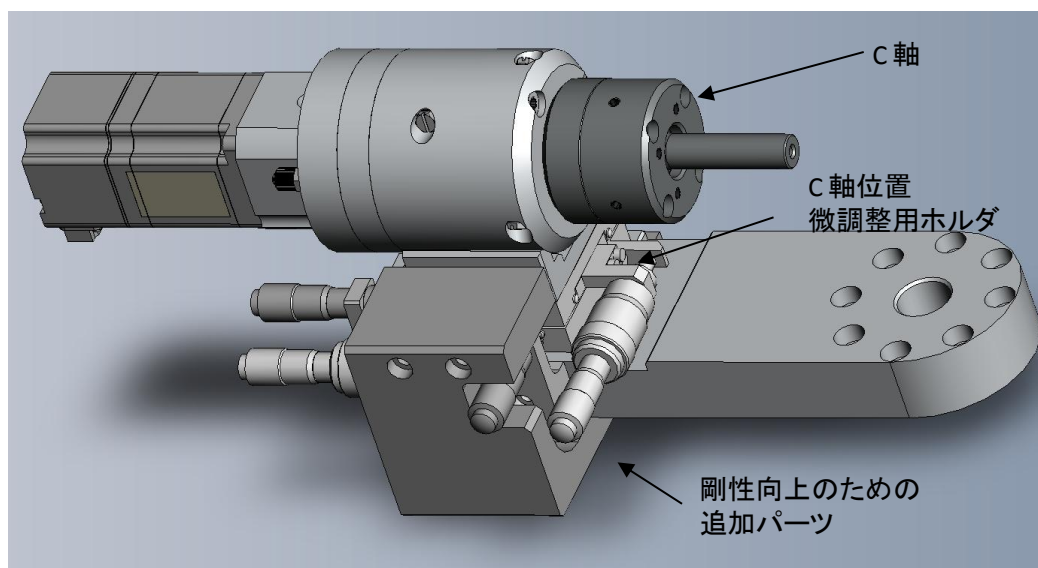


図4-12 C軸位置微調整用ホルダとその補強パーツ

4-4-2 レーザビーム特性の評価

次にフェムト秒パルスレーザー搭載5軸加工システムのビーム形状の評価を行った。主に加工に使用するSHGデバイス使用時の波長522nmのレーザーに対し、ガルバノスキャナ通過後のビーム形状をビームプロファイラにより測定した結果を図4-13に示す。プロファイラの仕様上、焦点位置での測定はできないため、焦点位置から20mm程度遠ざけた状態で測定している。同図に示す通り、ビーム形状はおおむね真円に近く、かつエネルギー分布もガウシアン形状であるため、想定通りのビーム形状が得られているといえる。

構築したシステムのレーザー加工特性の評価として、NPDに対し垂直レーザー加工を行い、1mm×1mmのポケット形状を加工した際の加工深さと焦点距離の関係を確認した。結果を図4-14に示す。デフォーカス量は焦点位置を0とし、焦点が加工対象から離れる方向をプラス、近づく方向をマイナスとしている。同図に示す通り、焦点位置から±1mm程度の範囲で加工深さが概ね変わらず、加工に有効な焦点深度が深いことがわかる。目標とする加工対象の工具の寸法は1mm以下であり、かつ工具形状の加工にはレーザービームの外周部で加工を行う平行レーザー加工を多用することから、焦点深度が深いことは平行レーザー加工時の加工領域が広いことを意味し、加工効率の向上に有利に働くと考えられる。最終的なフェムト秒パルスレーザー搭載5軸加工システムのレーザービーム特性を表4-12にまとめた

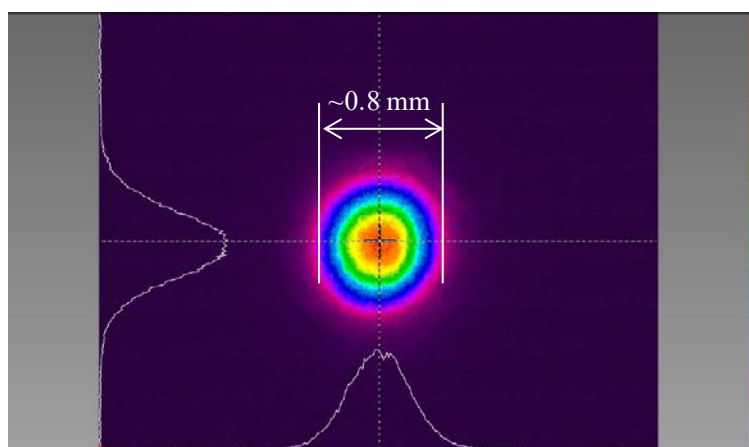


図 4-13 フェムト秒パルスレーザー搭載5軸加工システムの加工点付近のビームプロファイル
(波長522nmのレーザー使用時)

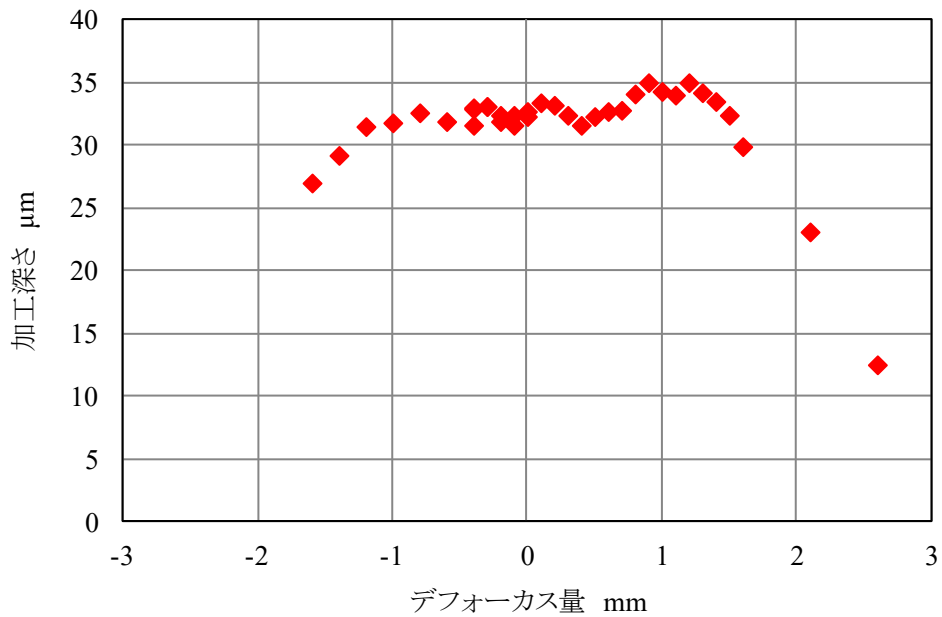


図 4-14 NPD に対して平行レーザ加工を行った際の加工深さとデフォーカス量の関係
(波長 522nm のレーザ使用時)

表 4-12 フェムト秒パルスレーザ搭載 5 軸加工システムのレーザ光学特性まとめ

レーザ波長 λ	522 nm	1045 nm
使用レンズ	Standard F-Theta lens JENar™ Focal length 100 mm, 532 nm	Standard F-Theta lens JENar™ Focal length 100 mm, 1030 - 1080 nm
最大平均出力 (加工点付近)	3.5 W	9 W
繰り返し周波数	200 kHz	
パルスエネルギー	17.5 μ J	45 μ J
焦点距離 F	100 mm	100 mm
入射ビーム径 D	5 mm	5 mm
焦点ビーム径 $2w$ *加工による実測値	20 μ m	40 μ m
ビーム品質 M^2	1.3	
レイリー長 b ($2\pi w^2/\lambda M^2$)	0.7 mm(計算値)	1.4 mm(計算値)
加工可能な焦点深度 (NPD 加工時)	2 mm (加工結果より)	-

4-4 結言

NPD のマイクロ回転工具を高能率かつ高精度に製作出来るようにする目的で、フェムト秒パルスレーザー搭載 5 軸加工機を開発した。以下に開発した内容を要約する。

- (1) 3 章にて決定した NPD 工具の加工に適したレーザー条件を実現するため、加工機にはレーザーを高速走査させるためガルバノスキャナ、赤外光を緑色光に変換させるための SHG デバイス、チャンファ形成のため広い B 軸可動範囲などを持たせた加工機を開発した。
- (2) フェムト秒パルスレーザーはそのピークエネルギーの高さから光ファイバでの光伝送が困難であるため、ミラーを用いて光路を形成した。軸移動用の装置に光学テーブルを隣接させテーブル上に光路を組み、それを加工機に導入し Z 軸と連動し、焦点位置を変更できる構成とした。
- (3) 加工機の精度、レーザービームの形状評価を行い、精度・ビーム形状がおおむね工具の成形に問題の生じない範囲に収まっていることを確認した。

第5章 フェムト秒パルスレーザーによる NPD 工具の成形

5-1 序言

本章では4章にて開発したフェムト秒パルスレーザー搭載5軸加工システムを用い、工具の製作方法の検討を行った。製作する工具の形状は2章で使用した工具と同様の形状であるR0.5 mmの一枚刃ボールエンドミルを目標とした。表5-1にフェムト秒パルスレーザーでのNPD工具成形の目標値を示す。本章ではこの目標値を達成するためのNPD工具成形方法について述べる。

表 5-1 NPD 工具のフェムト秒パルスレーザー成形における目標値

加工時間	<30 分
面粗さ	エッジ部:<0.05 μmRa その他:<0.3 μmRa
エッジ半径	<1 μm
その他	ポストプロセス不要・熱変質層が無い

5-2 実験方法

5-2-1 加工条件

製作する工具の寸法を図5-1に示す。工具の形状は第2章で使用したものと同様の、半径0.5 mmの一枚刃ボールエンドミルとした。工具を成形するための基本的なレーザー加工条件は3章にて最適化した条件を使用した。加工条件を表5-2に示す。

工具を成形するためのNPDブランク材を図5-2に示す。このブランク材は直径約1.2 mm、厚さ0.65 mmのNPDチップが超硬のシャンクに銀ロウ付けされている。図5-2からもわかるように、超硬シャンクの回転中心とNPDチップの中心にはずれが生じる場合があるが、これは超硬のシャンク中心に正確に銀ロウ付けをすることが困難なためである。

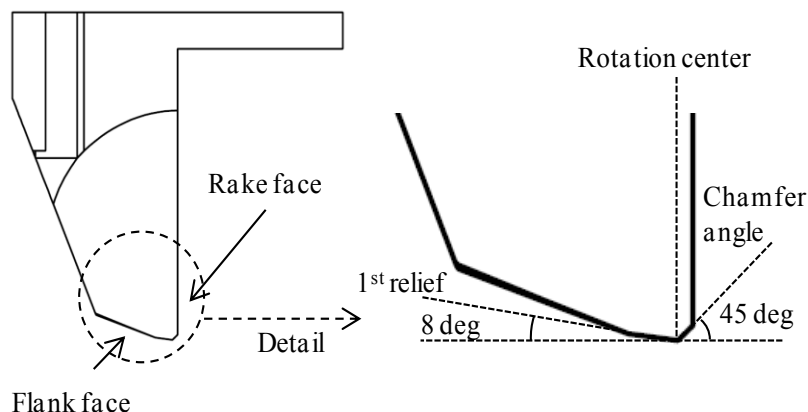


図 5-1 製作する NPD 工具の形状

表 5-2 NPD 工具の成形に使用したフェムト秒パルスレーザーの加工条件

パルス幅	350 fs
平均出力	3 W
パルスエネルギー	<0.015 mJ
繰り返し周波数	200 kHz
波長	522 nm
ビーム径	20 μm
レーザー走査速度 (パルス間隔)	100-400 mm/sec (0.5-2 μm)
偏波方向	円偏光

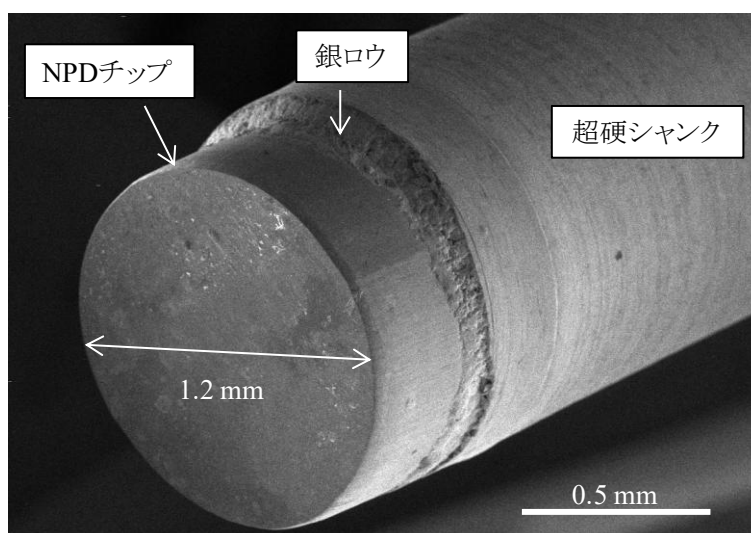


図 5-2 NPD ブランク材の SEM 画像

5-2-2 工具の各加工プロセス最適化

工具を製作するにあたって、まず工具成形に必要となる各加工工程を最適化するための予備実験を行った。

前述の通り、NPD チップは超硬の工具シャンクの回転中心に接着されていないため、芯出しを行う必要がある。また、円筒の径を正確に成形する必要があることから、円筒形状の成形工程の検証を行った。

これまでの実験結果を考慮し、円筒形状の加工には、図 5-3 のように工具の B 軸傾斜角度を 90° に保ちつつレーザを工具回転軸方向に高速で往復走査させながら、対象を回転させることにより加工する旋削加工を用いた。レーザ焦点位置は B 軸の回転中心になるよう設定した。レーザ走査速度はパルス間隔が $2\ \mu\text{m}$ になるよう $400\ \text{mm/sec}$ に設定し、回転速度はレーザが一往復した際に前回の照射位置からパルス間隔と同様の約 $2\ \mu\text{m}$ 移動するよう $7\ \text{rpm}$ とした。加工は工具が 20 回転するまで行い、加工時間は約 3 分となる。加工条件として、逆に回転速度を高速にし、レーザ走査速度を小さくすることで、同様のパルス間隔の条件を設定する方法も考えられるが、その場合、回転速度が大きくなる(約 $3000\ \text{rpm}$ が必要になる)ことにより、回転軸の発熱による寸法変化に起因する誤差が生じる可能性が考えられるため、前者の条件を採用した。

加工前後の工具の様子を加工機搭載カメラで観察した画像を図 5-4 に示す。同図に示す通り、加工前の偏芯が加工後は取り除かれていることが分かる。加工前の直径が $1.2\ \text{mm}$ 、目標の工具径が $1\ \text{mm}$ であるが、円筒加工時の取り代は銀ロウ付け時の偏芯量によって変化する。偏芯は最大で $0.1\ \text{mm}$ 程度となり、取り代は回転対象形状となるため、半径あたりの取り代としては $0\sim 0.2\ \text{mm}$ となる。最大値である $0.2\ \text{mm}$ の取り代であっても、特に予備加工などを行わずに、最終径にあわせて加工を行うことで十分目標径まで加工できることを確認している。

このレーザによる旋削加工では、加工体積が大きい加工初期は対象に照射されるビームの面積が大きいいため、加工が垂直レーザ加工的になり、加工効率が低い。加工が進行すると、ビームの外周部のみが対象に照射されることになるため、加工は平行レーザ加工的になり、面粗さの向上が期待できる。

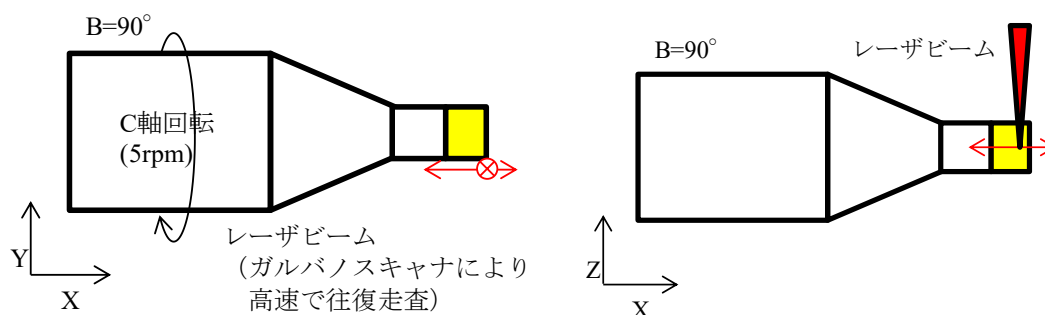
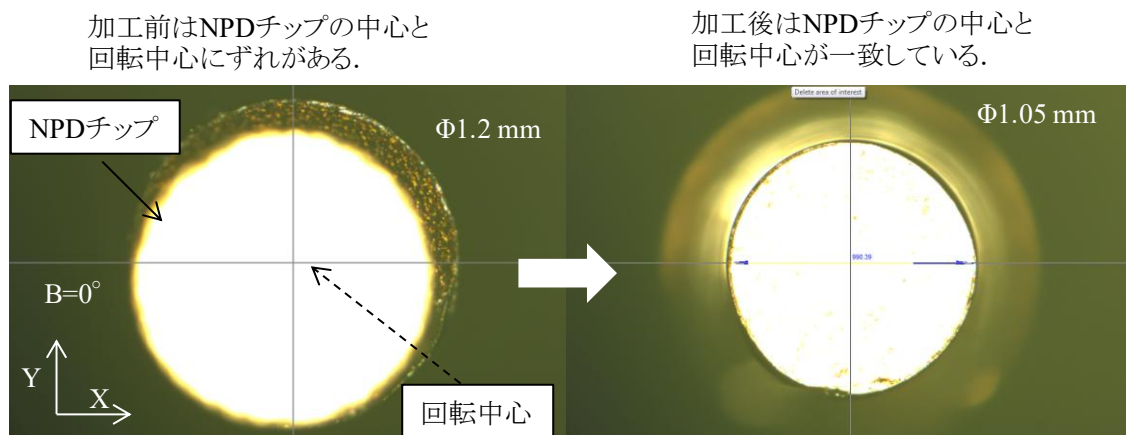


図 5-3 円筒形状加工の模式図



(a) 加工前の NPD ブランク

(b) 円筒成形後の NPD

図 5-4 円筒成形前後の NPD ブランク材のカメラ観察画像

円筒形状成形後の工程として、半球形状をさらに半分にした形状である四半球形状の成形工程の最適化を行った。この形状の加工順序において、図 5-5 に示すように、半球を形成した後に、半球の半分の除去する方法と、円筒の半分を除去した後に四半球を形成する 2 通りの順序が考えられる。

各加工順序で加工を行ったこと例の SEM 画像を図 5-6 に、加工面の形状と 3D プロファイルを図 5-7 に示す。図 5-6(b)のように半球を形成した後にその半分を除去する加工工程では、半球の断面が球の先端側につれて $60 \mu\text{m}$ 程度湾曲していることが分かる。一方、半円筒から四半球を形成した場合は、半球の断面は直線に近い。前者の加工方法では、加工体積が小さい球の先端側の加工の進行が早く過剰の加工されてしまうことが原因と考えられる。また 3 章の結果でも示したように、ビーム照射と平行方向の断面も完全な直線とすることは困難であり、入射方向が過剰に加工され、出射方向は加工が進行し難くなる。

そのため、今回のような単純な加工パスで成形を行う場合においては、加工体積が加工箇所によらず一定になるような加工方法が望ましく、本実験では後者の加工方法を採用する。加工体積に応じて、先端側のレーザー照射量を減らすなどの加工パスの変更も湾曲の改善には有効と思われるが、これにはレーザー加工の物理的なシミュレーションが必要となり今後の課題である。

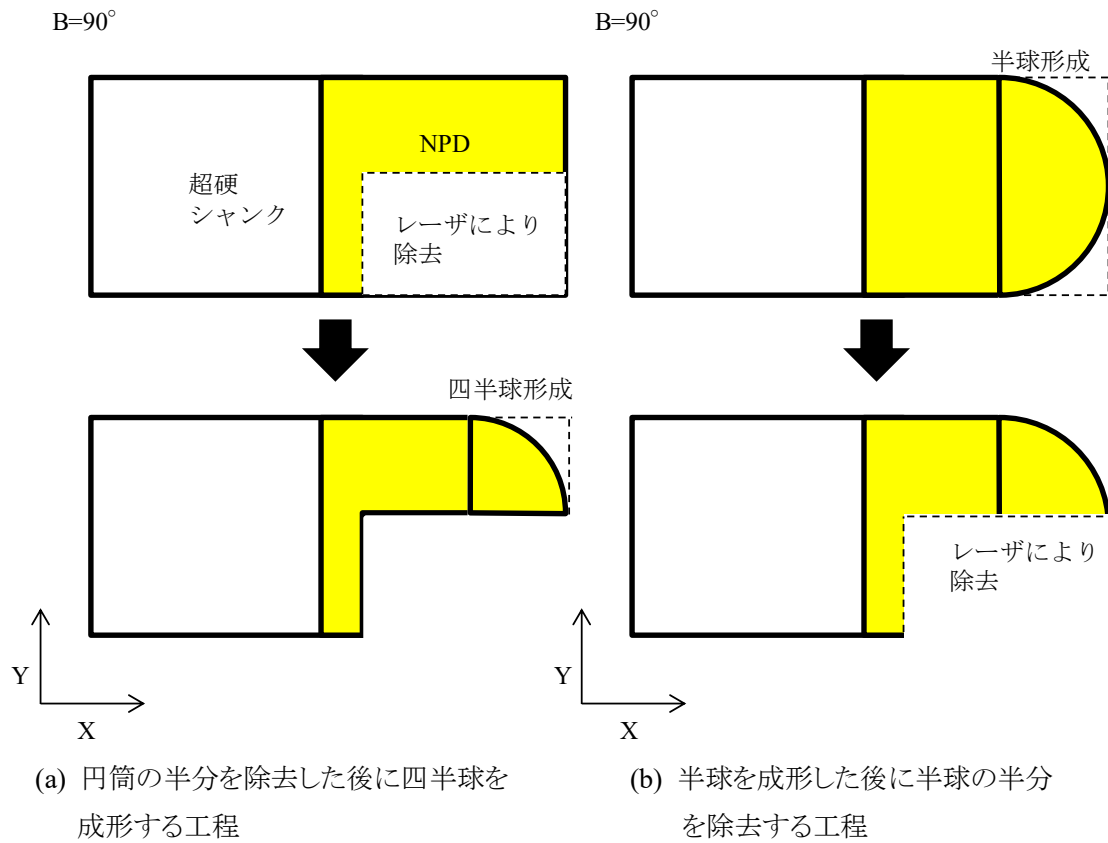
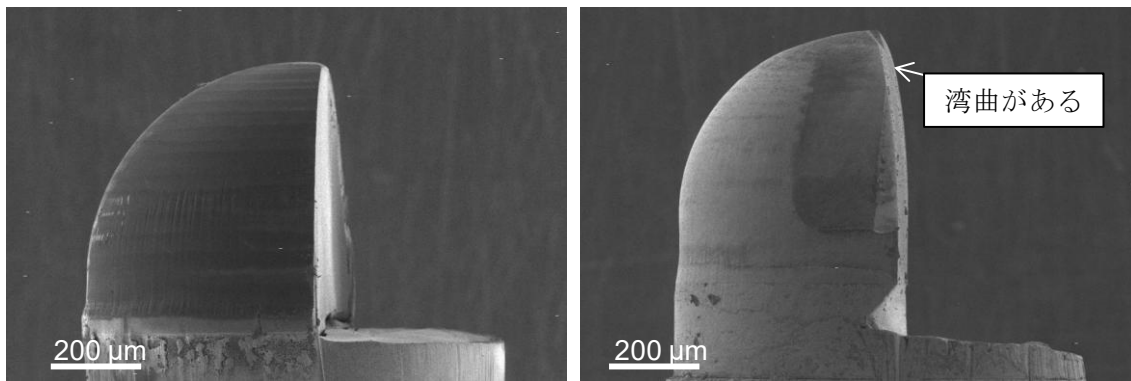


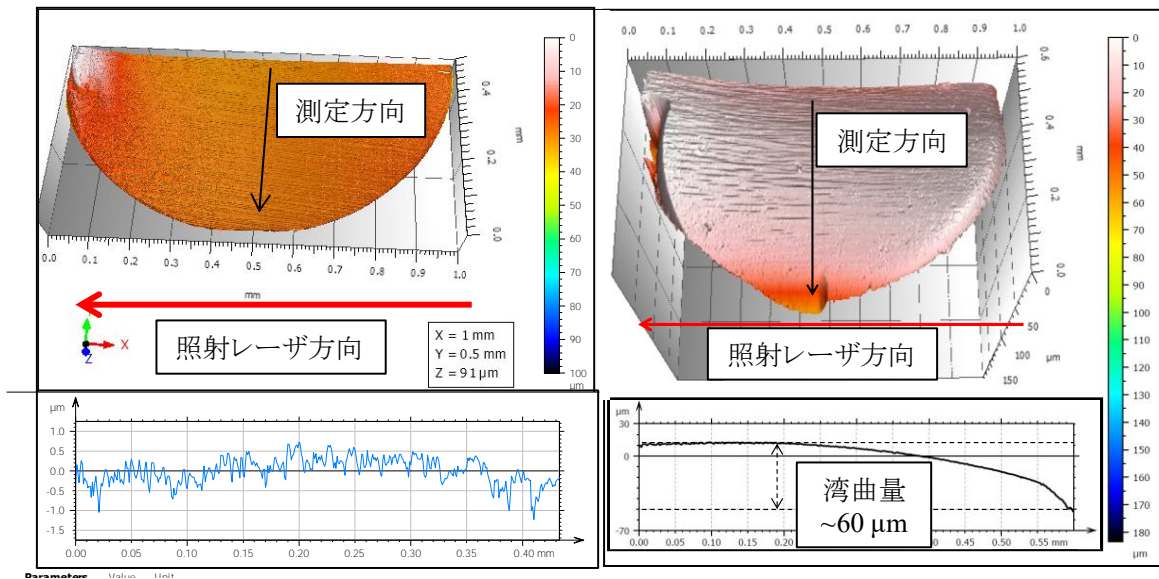
図 5-5 2 通りの四半球の成形工程



(a) 図 5-5(a)の加工順序で成形した四半球

(b) 図 5-5(b)の加工順序で成形した四半球

図 5-6 2 通りの加工順序で成形した四半球形状の SEM 画像



(a) 図 5-5(a)の加工順序で成形した四半球 (b) 図 5-5(b)の加工順序で成形した四半球

図 5-7 四半球形状の断面湾曲度の測定結果

四半球の成形後、エッジとして使用しない片側の刃を図 5-8 のような工程にて除去する。走査速度は 400 mm/sec とし、基本的には X 軸方向へレーザを走査させ、Y 軸方向に 2 μm の間隔を設け、三角形の走査パスにて除去した。この除去工程にてエッジが工具中心より小さくなると、加工時に残渣が出来てしまうため、除去する箇所は回転中心を超えないようにする必要がある。

逃げ面の加工は、2 章の結果でも述べた様に、逃げ面の面粗さが加工面にも影響を与えることから面粗さを小さくすることが非常に重要となる。そのため、逃げ面の加工は平行レーザ加工で行われる必要がある。加工方法としては図 5-9 のように、所定の逃げ角(第一逃げ角 8 度, 第 2 逃げ角 20 度, 第 3 逃げ角 45 度)の 3 段階の角度で直線状にレーザを往復走査させつつ、工具の傾斜軸である B 軸を 0~90°まで連続的に回転させることで行った。この時もレーザ走査速度は 400 mm/sec とした。B 軸の回転速度は 3 rpm とした。この回転速度は、4 章で述べたとおり B 軸の重心が回転中心から大きく外れており高速での回転は負荷が高いため、低負荷かつなるべく速い回転速度として採用した。

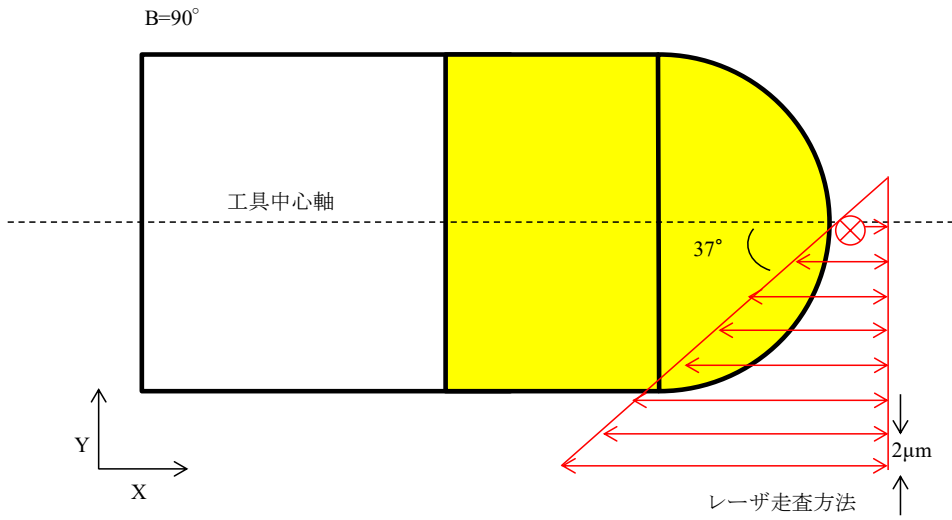


図 5-8 片側エッジの除去加工の加工工程

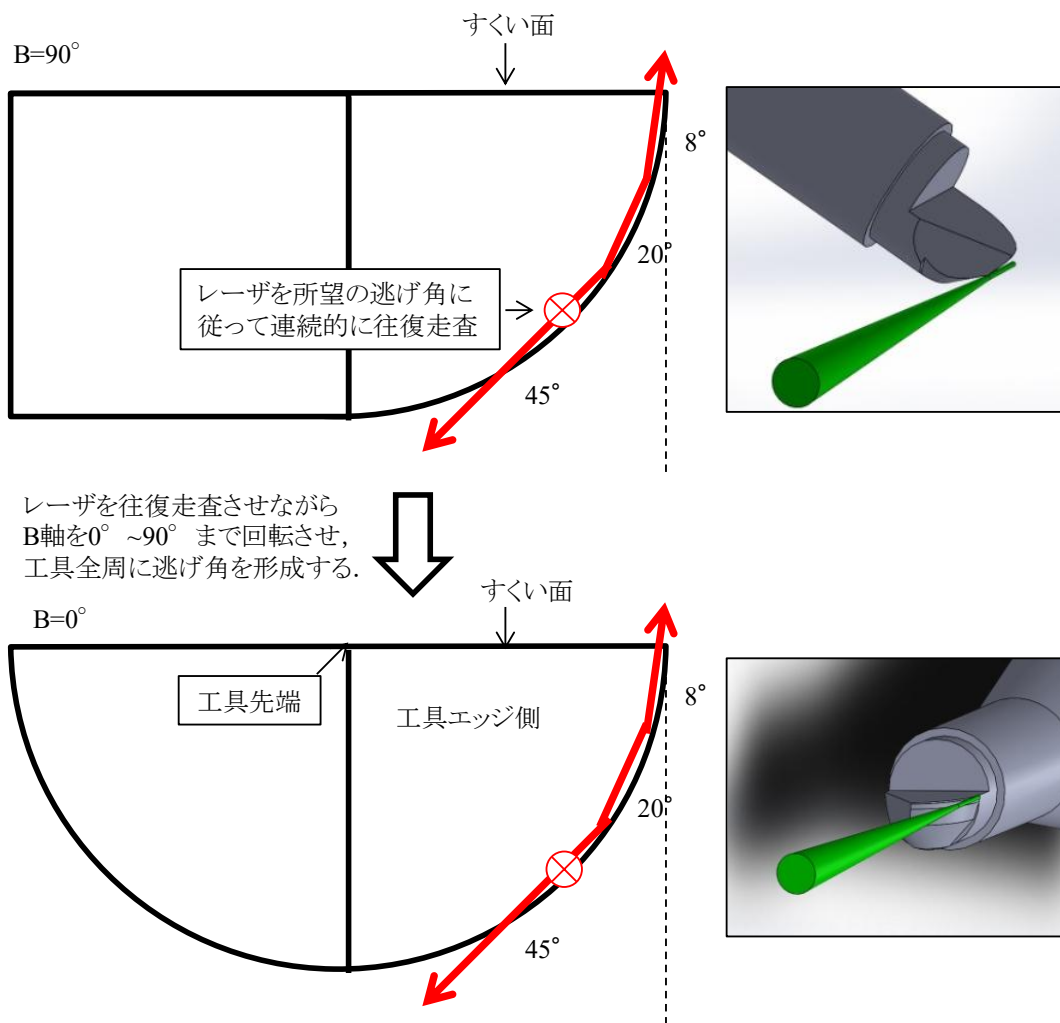


図 5-9 逃げ面加工の模式図

チャンファは4章で述べたとおり、5軸同時制御での加工が必要となる。またエッジ先端が加工においては最も重要となるため、レーザ照射側より面質が良好になるレーザ出射側がエッジ先端となるような加工方法とした。狙いチャンファ角度は 45° 、長さは $10\ \mu\text{m}$ である。図5-10に加工方法の模式図を示す。レーザ照射方向は-z方向に固定されているため、B軸を 135° 傾斜させた状態から開始し、そこからB軸を 90° まで回転させながら同時にC軸を 45° 回転させつつXYZ軸も工具の輪郭に沿うように移動させることで加工を行った。この軸移動の速度はガルバノスキャナによる走査速度と比較すると非常に遅いため、軸移動の速度では最適なパルス間隔を設定することが出来ない。そのため、レーザを連続的に $100\ \text{mm/sec}$ の速度で円状に高速走査させながら加工を行うことでパルス間隔を保持した。回転半径は $0.1\ \text{mm}$ とした。

実際に切削加工を行う際、工具回転時にエッジ以外の箇所が加工対象に接触することを防ぐため、球形状が残っている箇所を除去する必要がある。除去工程を図5-11に示す。図5-11(b)に示すようにC軸を 0° 、 $+40^\circ$ 、 -40° の角度にて割り出し、3面の除去加工を行う。加工パスは図5-11(a)に示す様な台形状に設定し、パルス間隔は $2\ \mu\text{m}$ とした。研磨による工具と比較すると、レーザ加工の特性上、球の湾曲形状が残存してしまい直線にはならないが、突出箇所さえ除去出来れば加工時に支障は無いと考えられる。

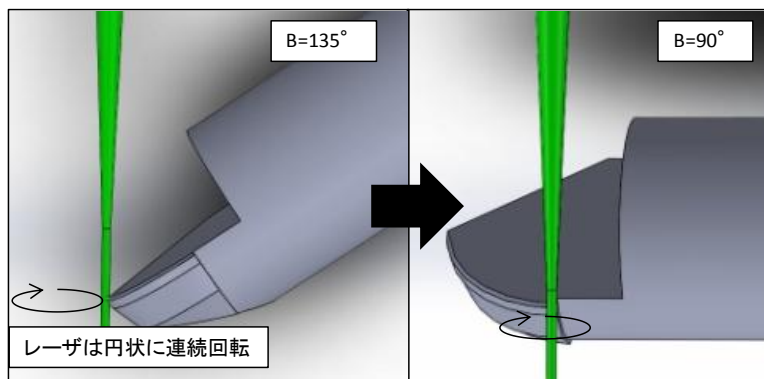
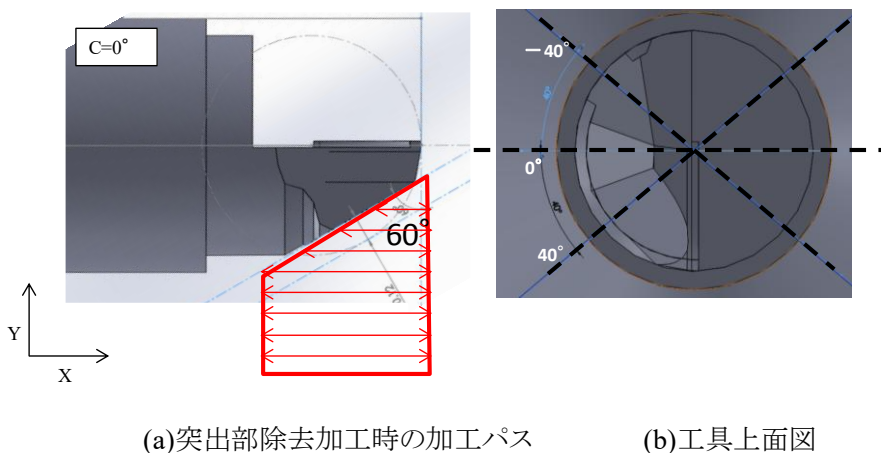


図 5-10 チャンファ加工の模式図



(a)突出部除去加工時の加工パス

(b)工具上面図

図 5-11 突出部の除去加工の模式図

5-3 NPD 工具のフェムト秒パルスレーザーによる成形

本節では前節の各加工工程を組み合わせる5軸フェムト秒パルスレーザー加工機を用いて実際にNPD工具を成形するプロセスの詳細を述べる。最終的な工具成形プロセスを図5-12に整理する。

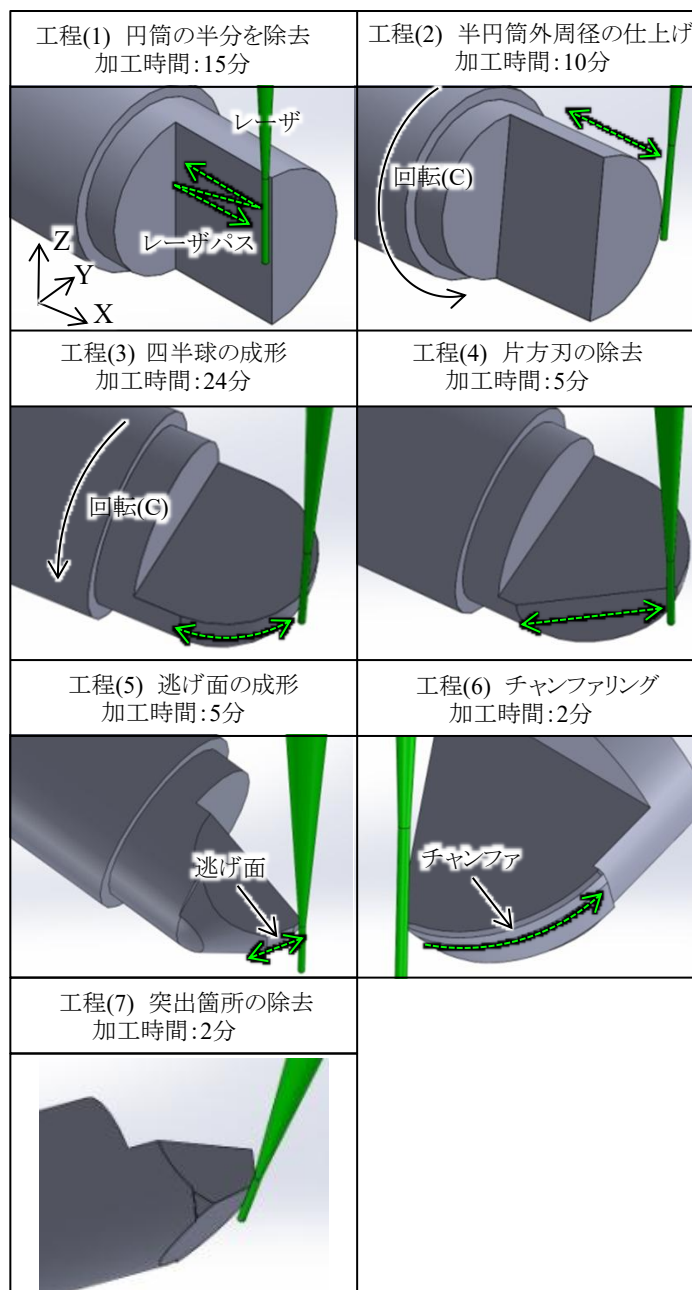


図 5-12 NPD ボールエンドミルの成形プロセス

図 5-12 中に示す工程(1)にて、円筒部の半分を除去した。除去工程は 3~4 回に分けて行い、最初の一回目で大まかな体積を除去し、その後カメラで残寸法を測定しながら微調整を行うことで寸法を調整した。この時チャンファ(チャンファ長 10 μm , チャンファ角度 45°)を考慮し、回転中心より 7 μm 大きく加工することでチャンファ加工後の工具先端が、回転中心に来るようにした。

その後、工程(2)にて外周部を旋削的に加工することで、NPD チップの芯出しを行う。ここで形成される円筒形状の外径はその後の工程にて除去されるため、正確な径を加工する必要はないが、最終設定値である直径 1 mm に加え 0.1 mm の加工余地を残し、直径 1.1 mm に仕上げた。最初の工程で半円筒を除去し、その後円筒の外周径を仕上げる工程を行うのは、第 3 章で示した平行レーザ加工断面の湾曲が、半円筒が除去された面においてもレーザ入射側、出射側で顕著に表れるため、そのゆがみを取り除くことを狙った。半円などが除去された面は、後の加工においてエッジが形成される部分であり精度が非常に重要となる。次に、工程(3)にて、レーザ光を 1/4 円弧状のパスにて往復走査させながら C 軸を連続回転させることで四半球状に成形した。狙いの直径は最終値と同様の 1 mm とした。工程(4)にて、工具のエッジとして使用しない片側のエッジを往復走査で除去した。工程(5)では、レーザを往復走査させつつ、所望の逃げ角(第 1 逃げ角 8°, 第 2 逃げ角 20°)に従って逃げ面を成形した。工程(6)では、工具をチャンファ角の設定値 45°に傾斜させて加工した。工具エッジ部全周にチャンファを形成するため、B 軸と C 軸を同時に回転させつつ、XYZ 軸を移動させ、レーザ照射角度が工具エッジに対して常に 45°を保つように 5 軸同時制御加工を行った。この際、機械軸移動による加工が主体となるため、レーザ走査速度が最大でも 100 mm/min 程度になる。これは、ガルバノスキャナを用いた場合のレーザ走査速度 400 mm/sec と比較すると単位時間あたりのエネルギー照射量が 240 倍となることを意味する。この過大なエネルギー照射がもたらす熱影響による加工面品位の悪化や表面層のグラファイト化を避けるため、レーザ光を円状に高速走査させながら断続的に加工を行った。工程(7)では、回転時に突出する球形状が残存している箇所を 3 回の割り出しにより除去した。工程(1)から(7)まで、工具を加工機上から取り外すことなくワンチャックで最終形状まで成形している。総加工時間は約 1 時間であり、目標である 30 分以内に抑えることはできなかったものの、研磨による NPD 工具成形には数時間を要することから、加工時間の大幅な短縮に成功したといえる。今後は加工条件の最適化を進めることにより、更なる高能率成形を達成し 30 分以内の成形時間を目指す。

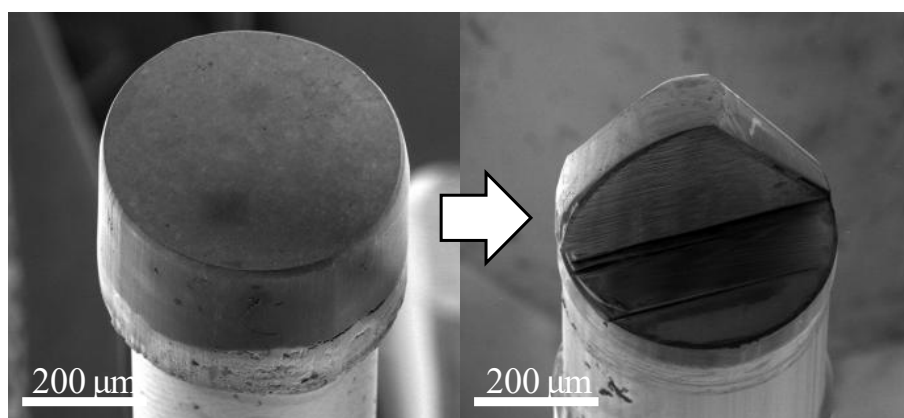
5-4 フェムト秒パルスレーザーにより成形した NPD 工具の評価

5-4-1 形状評価

前述の加工工程にて製作した NPD 工具の加工前後の SEM 画像を図 5-13 に示す。段取りなどを除いた加工時間は約 1 時間であり、最終目標である 30 分以内の製作時間は達成出来なかったものの、市販の NPD 工具が研磨仕上げに数時間必要であることから、製作時間の大幅な短縮に成功した。

工具のフェムト秒パルスレーザー成形時におけるグラファイト化の有無を確認するため、フェムト秒パルスレーザーにより成形した NPD 工具表面数ヶ所に対して、ラマン分光分析を行った結果を図 5-14 に示す。工具エッジ部先端 (spot[a])、工具エッジ部サイド (spot[b]) および工具根元部 (spot[c]) のいずれの箇所においても、ダイヤモンドに対応する 1333 cm^{-1} 付近のピークのみが認められた。よって、成形した工具表面はグラファイト化しておらず、均質な表面性状が得られているといえる。

フェムト秒パルスレーザー成形 NPD 工具表面の面粗さを測定した所、加工に関与し、最も重要となる逃げ面の面粗さは 45 nmRa と測定された。比較のため、第 2 章で用いた市販 NPD 工具 (研磨、未研磨) とフェムト秒パルスレーザー成形 NPD 工具の逃げ面の様子の SEM 画像を図 5-15 に示す。未研磨 NPD 工具の面粗さ 70 nmRa と比較してフェムト秒パルスレーザー成形面は低い値が得られているが、第 3 章のレーザー加工の基礎実験で得られたフェムト秒パルスレーザーでの最良面粗さである 20 nmRa を達成することは出来なかった。これは、以下の要因が考えられる。光学定盤上にレーザー光源と光学系を組み上げて実験する単純平面加工と比較すると、本実験では放電加工機をメインフレームとする 5 軸加工機を用いたために、レーザー光源から加工照射点までのレーザー経路が長い。そのため、ビームのアライメントや光路内雰囲気の影響が十分でなく、ビーム品質に悪影響を及ぼした恐れがある。また、レーザーを加工面に対して平行に照射する工程が多いが、加工形状が複雑かつ加工領域が広いことで、レーザー焦点が狙った加工点まで到達できなかった可能性も考えられる。今後も引き続き、レーザー加工機の改良やレーザーパスの再検討を行うことで、更なる高精度・高品位加工を目指す。



(a) 加工前

(b) 加工後

図 5-13 フェムト秒パルスレーザー加工前後の NPD 工具の様子

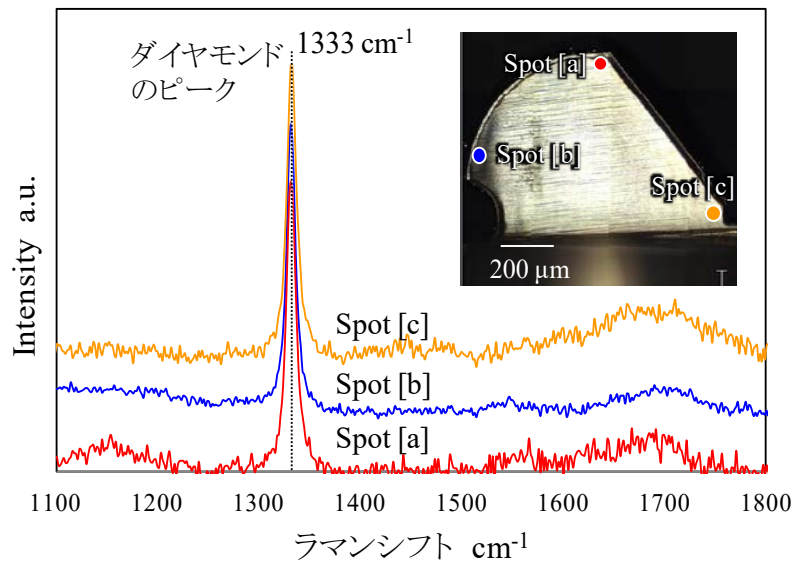
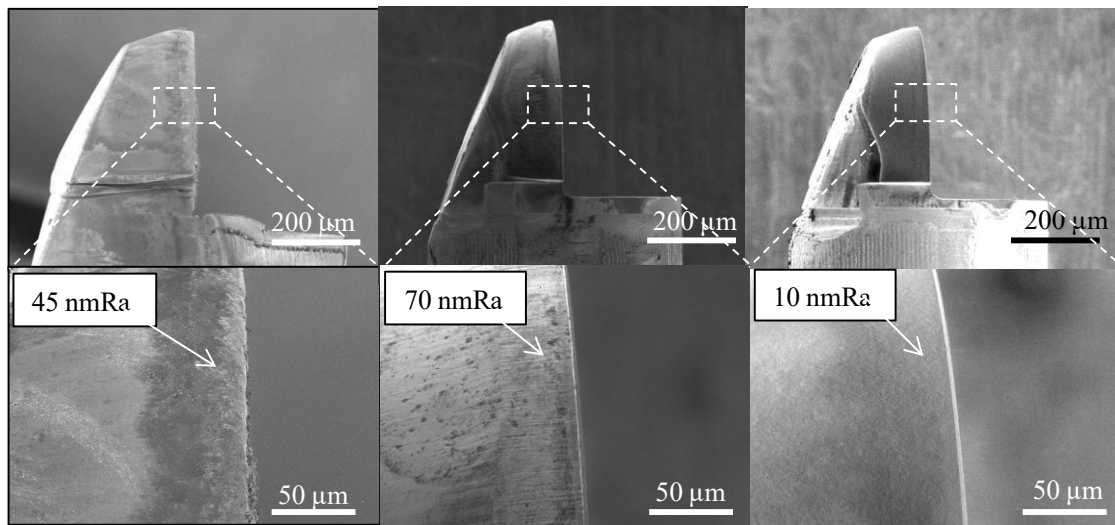


図 5-14 フェムト秒パルスレーザーにより成形した NPD 工具のラマン分光分析結果



(a) フェムト秒レーザー成形NPD工具 (b) 未研磨NPD工具 (c) 研磨仕上げNPD工具

図 5-15 フェムト秒パルスレーザー成形 NPD 工具と市販 NPD 工具の逃げ面性状の比較

成形した工具のすくい面からチャンファ部、逃げ面に至る部分のエッジ部プロファイルを測定した結果を図 5-16 に示す。加工特性に大きな影響を及ぼすと考えられる第 1 逃げ面の角度は、目標値 8° に対し、最も誤差が少ないもので実測値 8.6° であった。角度を完全に制御することは現時点では困難であり、 1° 以上の誤差が生じる場合もあった。また逃げ角は、レーザー走査の角度を段階的に変化させることで制御しているが、レーザー加工の特性上、角度を急峻に変化させることは難しいという

課題がある。市販工具の許容角度誤差が $\pm 0.5^\circ$ であるため、さらなる形状精度の改善が必要である。エッジの角度について誤差が大きい原因としては、加工機の運動精度が十分でないことが考えられる。また、現加工システムでは加工機上での加工対象の寸法の測定をカメラにより行っているが、焦点深度の浅さから工具のように形状が3次元的になると測定が困難になるため、形状誤差をより低減するにはレーザによる寸法測定システムなど何らかの加工機上での測定機構を設ける必要がある。

図 5-17 は工具エッジ部の輪郭精度を測定した結果である。工具半径の目標値である $500 \mu\text{m}$ からの誤差はおよそ $\pm 1 \mu\text{m}$ 以内であり、市販工具の許容誤差である $\pm 1 \mu\text{m}$ と比較しても遜色が無い結果が得られた。

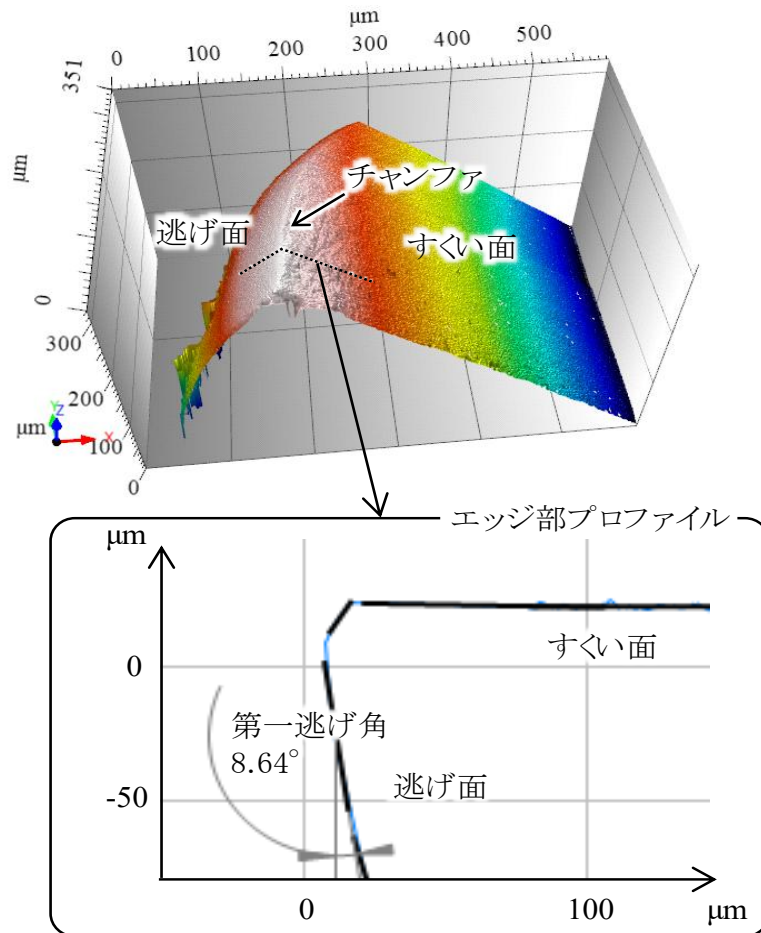


図 5-16 成形した NPD 工具の 3 次元形状測定結果

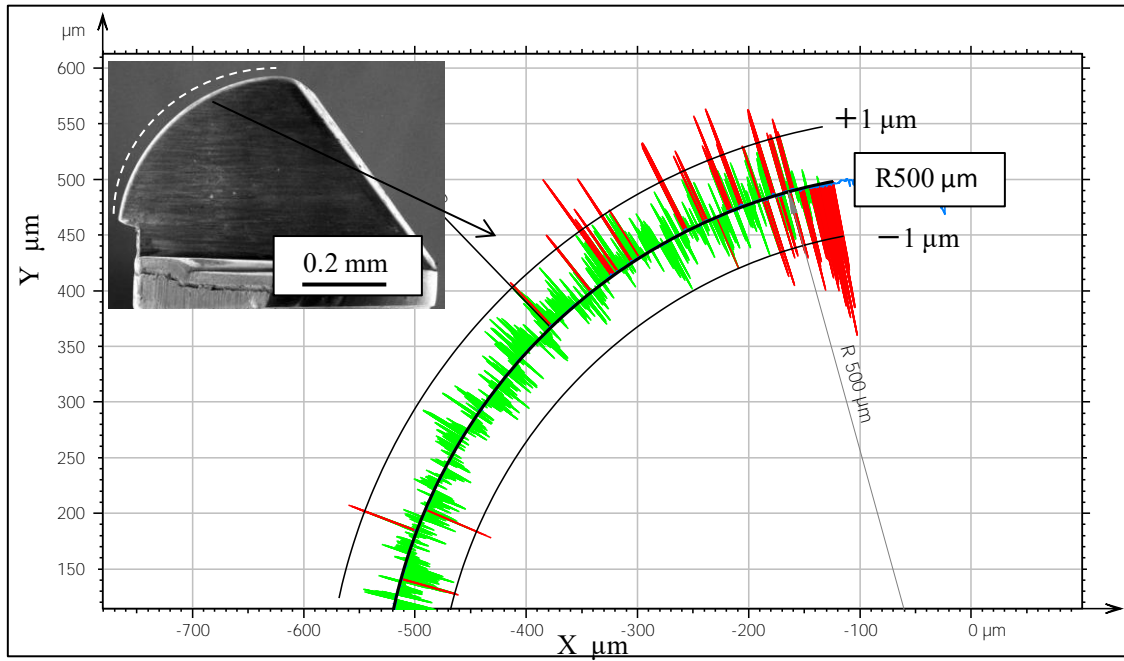


図 5-17 成形した NPD 工具のエッジ輪郭測定結果

5-4-2 加工性能評価

フェムト秒パルスレーザにて成形したNPD 工具を用いて実際に超微粒子超硬合金(AF1)を加工し評価を行った。工具は比較的形状誤差が少ないものを選定した。加工条件は2章で使用した条件と同様の表5-3の条件を用いた。

フェムト秒パルスレーザ成形NPD 工具を用いて加工した被削材の面粗さを、第2章で用いた研磨仕上げNPD 工具での加工面を比較した結果を表5-4、白色干渉計にて加工面を測定した結果を図5-18、加工前後の工具のSEM 画像を図5-19に示す。図5-19に示すように、被加工物と接触すべきチャンファの先端ではなく第一逃げ面の途中から摩耗が見られた。これは逃げ角の形状誤差により、想定した刃先の先端よりも逃げ面が突出していることが要因と考えられる。この工具形状では、加工は切削加工ではなく、研削的な加工になっていると考えられ、面粗さは2章の切削実験の結果とは単純に比較できないが、面粗さは5 nmRaと測定された。研磨仕上げNPD 工具の逃げ面粗さが10 nmRa、未研磨NPD 工具では70 nmRa、フェムト秒パルスレーザ成形NPD 工具では45 nmRaであり、逃げ面粗さが加工面粗さに寄与するという2章の実験結果から、現状のフェムト秒パルスレーザ成形NPD 工具は研磨仕上げNPD 工具と未研磨NPD 工具の中間程度の加工性能を示すことが予想される。

摩耗量は研磨済みNPD 工具とほぼ同等であったため、フェムト秒パルスレーザ加工によるNPDの劣化などの影響は無いことが推察される。今後の課題として、工具の形状精度を改善し、研磨仕上げNPD 工具、未研磨NPD 工具とフェムト秒パルスレーザ成形されたNPD 工具を同加工条件下にて比較し、評価を行う必要がある。

表 5-3 フェムト秒パルスレーザ成形 NPD 工具での加工条件

被削材	超微粒子超硬合金
工具回転数	120,000 min ⁻¹
クーラント	オイルミストブロー (非塩素油脂系不水溶性油)
工具法線方向切込み量	5 μm
テーブル送り速度 (一刃あたり切込み量)	600 mm/min (5 μm/rev)
ピックフィード量	5 μm
切削距離 <i>L</i>	50 m
工具傾斜角度	45°
切削速度	267 m/min

表 5-4 フェムト秒パルスレーザー成形 NPD 工具と研磨仕上げ NPD 工具による加工面の比較

	研磨仕上げ NPD 工具	フェムト秒パルスレーザー成形 NPD 工具 (エッジ形状誤差により参考値)
平均面粗さ Ra	17 nm	5.8 nm
PV 値	98.6 nm	38.4 nm

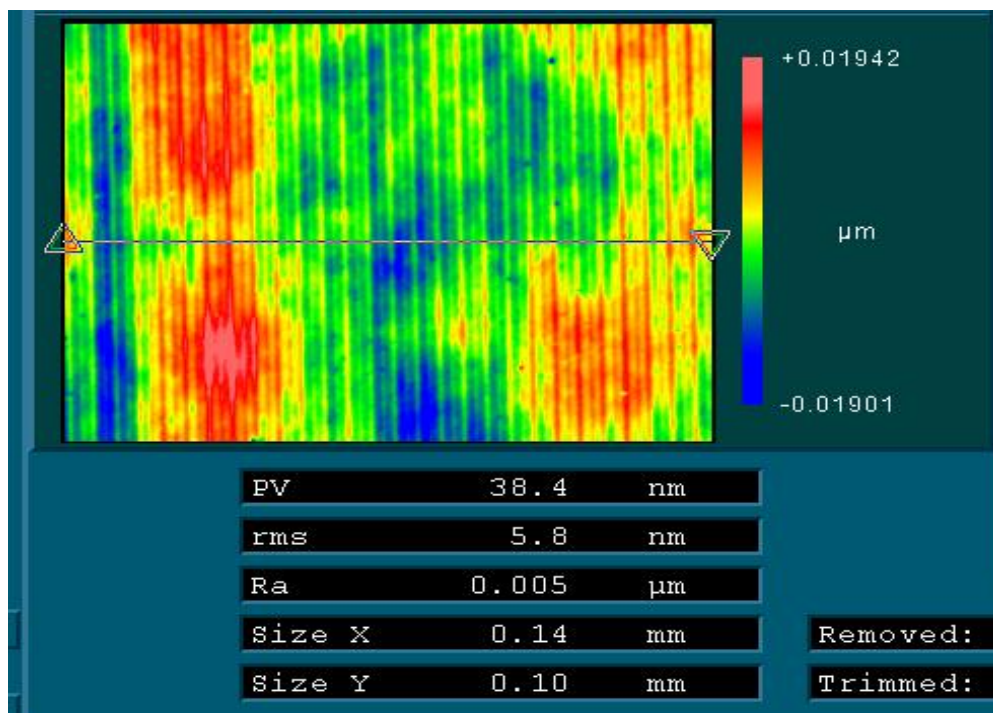


図 5-18 フェムト秒パルスレーザーで成形した NPD 工具による超硬合金の加工面

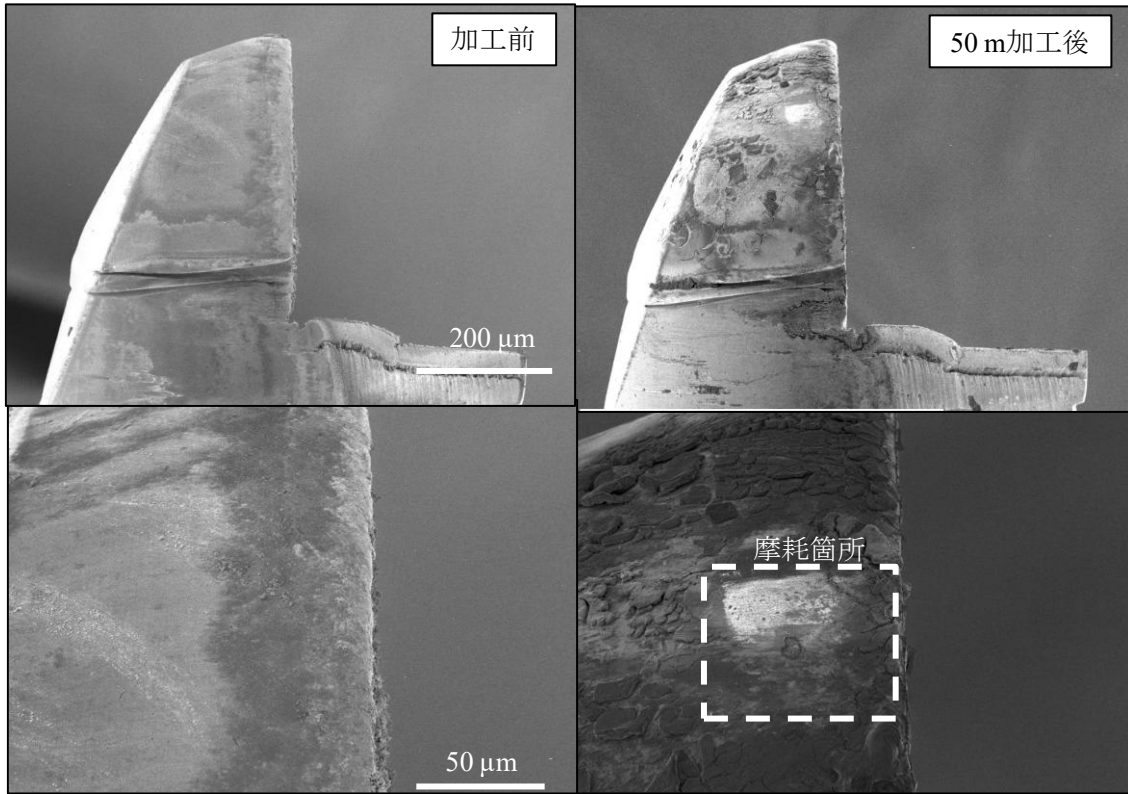


図 5-19 超合金加工前後の NPD 工具逃げ面の様子

5-5 結言

フェムト秒パルスレーザを用いて半径 0.5 mm の NPD 製一枚刃ボールエンドミルを成形する方法を検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 想定される工具の各加工工程の最適化を行い、同様の加工方法でも加工前の形状によって加工後の形状が異なり、加工順序が重要であるという結果を得た。これは物理的な工具が被加工物と接触した箇所が加工されるのとは異なり、レーザ加工の場合は、レーザエネルギーが照射され、ある閾値以上となった箇所から加工現象が起こるため、加工箇所の形状により照射されるエネルギーが変化するためであると考えられる。加工精度を改善するためには、加工対象の形状までも含めたレーザ加工の物理的なシミュレーションから加工パスを生成する必要がある。
- (2) 最適化した加工工程により実際に工具を成形し、加工後もグラファイト化などの熱影響がほぼ無いことをラマン分光によって確認した。平滑さが求められる逃げ面の面粗さは最良 45 nmRa 程度となり、市販の未研磨仕上げ NPD 工具の約 70 nmRa より低い値が得られた。基礎実験でのフェムト秒パルスレーザ加工面の面粗さの最良値が 20 nmRa であることから、面粗さに改善の余地はあるものと考えられる。工具エッジの形状精度は市販工具と比較するとまだ十分ではなく、加工機の運動精度や加工機上での測定システムなどにも改善の必要がある。
- (3) 工具製作に要した加工時間は約 1 時間であり、同寸法の NPD 工具を研磨にて仕上げた場合の製作時間が数時間であることを考慮すると、加工時間を大幅に短縮することに成功した。更に面粗さを向上させ、研磨工程を省くことが出来れば、NPD 工具の低コスト化が期待できる。

第6章 結論

NPD は高硬度かつ異方性が無いことから、マイクロ回転工具として優れた素材とされるが、その加工の難しさから工具形状に成形するのに時間を要し、工具単価が割高になるため、十分に普及していないという課題がある。

そこで本研究では、1) NPD 工具の他のダイヤモンド工具との加工特性の比較を行い、NPD 工具の優位性を検証した後、2) 高能率な NPD の加工方法を確立するため、パルスレーザによる NPD 基礎加工実験を行い、フェムト秒パルスレーザが NPD 加工に有効であることを確認した。3) フェムト秒パルスレーザが NPD の加工に有効であることが確認できたため、複雑な工具形状を成形することができる、フェムト秒パルスレーザを搭載した 5 軸の加工機の開発を行った。4) 開発したフェムト秒パルスレーザ搭載 5 軸加工機を用いて、実際に工具形状を製作する方法を検討した。以下に本研究で得られた結果をまとめる。

第 2 章にて、NPD, PCD, SCD3 種類のダイヤモンド素材の加工特性を、同形状の工具を用いて統一条件下で加工を行うことで検証した。また NPD 工具においては逃げ面、すくい面、チャンファ部分に研磨仕上げを施したタイプと、粗加工のみのタイプの 2 種を用意し、エッジの仕上げ状態が加工面に及ぼす影響の調査を行った。結果として、PCD, SCD 工具では長距離加工においてチッピングが観測されたものの、NPD 工具では高負荷、長距離の加工においてもチッピングなどの異常摩耗が発生せず、耐摩耗性の高さが確認された。また、研磨を施した NPD 工具と未研磨の NPD 工具を比較すると、切削距離が比較的短い場合においては両工具で 20 nmRa 程度の良好な加工面が得られたが、切削距離が長くなり、工具摩耗が進行してくると、未研磨仕上げ NPD 工具での加工面の面粗さは 100 nmRa 以上となり顕著な悪化が見られた。これは摩耗が進行すると、加工に関与する逃げ面の面積が大きくなるため、加工が主に逃げ面で行われるため、逃げ面の面粗さが加工面に転写されるためと考えられる。つまり高性能の NPD 工具を形成する場合はエッジ、特に逃げ面の面粗さを低くする必要があるという結論が得られた。

第 3 章にて、NPD を高能率に加工する方法の確立を目的として、NPD に対してパルスレーザでの基礎加工実験を行った。ナノ秒パルスレーザとフェムト秒パルスレーザの 2 種のパルス幅を持つレーザでの加工特性の比較を行い、パルス幅が長いナノ秒パルスレーザでは、熱的な加工になるため、加工面の悪化、加工表面のグラファイト化やデブリの再付着などの問題があり、工具成形時に後処理が必要になると考えられるため、高能率、高精度の工具を成形には適していないという結論が得られた。一方フェムト秒パルスレーザを用いた場合は、超短パルスでの加工は熱的過程ではなくアブレーション加工になるため、グラファイト化、デブリの付着がほぼ無いことが確認され、加工面の面粗さも最良 20 nmRa と研磨レスで工具を成形出来る可能性があるという結論を得た。

4 章にて NPD 工具成形用の装置として、フェムト秒パルスレーザを搭載した 5 軸加工機の開発を行った。3 章にて検証された工具成形に必要な要件としてガルバノスキャナによるビームの高速走査、135°以上の工具傾斜角度の可動範囲を取り入れた加工システムを開発した。

5 章にて、開発した工具成形装置を用いて、実際に工具半径 0.5 mm の NPD 一枚刃ボールエン

ドミルの成形方法の検討を行った。製作した工具逃げ面の最良面粗さは 45 nmRa と基礎加工時に得られた最良面粗さである 20 nmRa は達成できなかったものの、未研磨工具の 70 nmRa よりは良好な結果が得られた。またグラファイト化もなく研磨レスで工具を製作できる可能性があることを確認した。工具製作に要した加工時間は約 1 時間であり、同寸法の NPD 工具に研磨仕上げを施した場合の製作時間が数時間であることを考慮すると、フェムト秒パルスレーザにより研磨工程を省くことが出来れば、製作時間を大幅に短縮し NPD 工具の低コスト化が期待できる。

謝辞

本研究は、著者が慶應義塾大学大学院理工学研究科在学中に、青山英樹教授のご指導のもとで行われたものであり、同教授より賜ったご指導とご鞭撻に対して厚く御礼申し上げます。

ご多忙の中で貴重な時間を割かれて本論文をご査読いただき、有益なご助言を賜りました、慶應義塾大学大学院理工学部総合デザイン工学専攻 システム統合工学専修 柿沼 康弘教授，マルチディシプリナリ・デザイン科学専修 小茂鳥潤教授，閻紀旺教授，カリフォルニア大学バークレー校 山崎和雄教授に厚くお礼申し上げます。

本研究に対して有益なご助言を頂いた、国立研究開発法人理化学研究所 片平和俊博士に謹んで感謝の意を表します。

さらに、本研究に対して多大なご協力を頂いた、株式会社ソディック、住友電工ハードメタル株式会社、IMRA America, Inc. に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 京極秀樹:積層造形技術の現状と応用展開, スマートプロセス学会誌, Vol. 3, No. 3 (2014), pp. 148-151.
- 2) 檜原弘之:金型産業における Additive Manufacturing 技術の動向と研究事例, 精密工学会誌, Vol. 82, No. 7 (2016), pp. 634-638.
- 3) 京極秀樹:レーザーを用いた金属 Additive Manufacturing 技術の最新動向, 精密工学会誌, Vol. 82, No. 7 (2016), pp. 619-623.
- 4) 京極秀樹:金属積層造形技術の可能性と技術開発動向, Materia Japan, Vol. 57, No. 4 (2018), pp. 140-144.
- 5) 中村良光, 吉田徳雄:金属光造形複合加工による精密金型製作, 精密工学会誌, Vol. 69, No. 9 (2003), pp. 1242-1245.
- 6) 松村隆:切削技術における動向と産学連携, 精密工学会誌, Vol. 84, No. 1 (2018), pp. 33-37.
- 7) 藪谷誠:超精密加工機およびその要素技術の今後について, 精密工学会誌, Vol. 75, No. 1 (2009), pp. 126-127.
- 8) 竹内芳美:超精密マイクロ切削加工, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 71, No. 701 (2005), pp. 1-4.
- 9) 竹内芳美:マイクロ切削加工, 精密工学会誌, Vol. 68, No. 2 (2002), pp. 167-170.
- 10) 早乙女康典: マイクロ塑性加工技術の現状と展望, 精密工学会誌, Vol. 69, No. 9 (2003), pp. 1221-1225.
- 11) M. Geiger, M. Kleiner, R. Eckstein, N. Tiesler and U. Engel: Microforming, Annals of the CIRP, Vol. 50, No. 2 (2001), pp. 445-462.
- 12) G. Byrne, D. Dornfeld and B. Denkena: Advancing Cutting Technology, CIRP keynote, Vol. 52, No. 2 (2003), pp. 483-507.

- 13) D. Dornfeld, S. Min and Y. Takeuchi: Recent Advances in Mechanical Micromachining, CIRP keynote, Vol. 55, No. 2 (2006), pp. 745-768.
- 14) 井川直哉, 島田尚一:超精密加工用ダイヤモンド工具, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 50, No. 456 (1984), pp. 1321-1326.
- 15) 鴻野雄一郎:超高压焼結体工具, 精密工学会誌, Vol. 61, No. 6 (1995), pp. 754-758.
- 16) 戸倉和:ダイヤモンド-性質・合成・加工・応用-, 精密工学会誌, Vol.78, No. 3 (2012), pp. 212-215.
- 17) E. M. Wilks and J. Wilks: Experiments on the Grinding and Polishing of Diamond-1, Ind. Diamond Rev., Vol. 26, No. 303 (1966), p. 52.
- 18) 砂川一郎:ダイヤモンド単結晶の劈開, 精密機械, Vol. 32, No. 8 (1966), pp. 585-591.
- 19) 上神謙次郎:単結晶ダイヤモンド工具とその結晶方位, 精密工学会誌, Vol. 61, No. 6 (1995), pp. 759-763.
- 20) 南久, 渡邊幸司, 増井清徳, 鍋倉伸嘉:放電加工による焼結ダイヤモンド工具の成形加工, 電気加工学会誌, Vol. 44, No. 105 (2010), pp. 17-24.
- 21) G. Spur, M. Puttrus and U. W. Wunasch: Wire EDM of PCD, Industrial Diamond Review, Vol. 48, No. 529 (1988), pp. 24-28.
- 22) 井上茂, 青山藤嗣郎:ダイヤモンド焼結体工具の放電加工条件に関する研究 除去体積と加工面積が一定の場合, 砥粒加工学会誌, Vol. 57, No. 4 (1997), pp. 124-130.
- 23) 仙波卓弥, 岡崎隆一, 角谷均:ナノ多結晶ダイヤモンド製マイクロボールエンドミル, 精密工学会学術講演会講演論文集, (2009), pp. 29-30.
- 24) H. Sumiya and T. Irifune: Indentation hardness of nano-polycrystalline diamond prepared from graphite by direct conversion, Diamond and Related Material, Vol. 13, No. 10 (2004), pp. 1771-1776.
- 25) T. Irifune, A. Kurio, S. Sakamoto, T. Inoue and H. Sumiya: Ultra-hard polycrystalline diamond

from graphite, *Nature*, Vol. 421, (2003), pp. 599-600.

- 26) H. Sumiya: Novel development of high-pressure synthetic diamond “Ultra- hard nano-polycrystalline diamond”, *SEI Technical Review*, Vol. 74, (2012), pp. 15-23.
- 27) 角谷均, 入船徹男: 高硬度ナノ多結晶ダイヤモンドの微細構造と機械特性, *SEI テクニカルレビュー*, Vol. 172, (2008), pp. 82-88.
- 28) 角谷均, 入船徹男: 各種炭素材料からの直接変換による高純度ナノ多結晶ダイヤモンドの合成とその特性, *高圧力の科学と技術* Vol. 16, No. 3 (2006), pp. 207-215.
- 29) H. Sumiya and T. Irifune: Hardness and deformation microstructures of nano-polycrystalline diamonds synthesized from various carbons under high pressure and high temperature, *Journal of Materials Research*, Vol. 22, No. 8 (2007), pp. 2345-2351.
- 30) 角谷均, 原野佳津子, 村上大介: ナノ多結晶ダイヤモンドの切削工具への応用, *SEI テクニカルレビュー*, Vol. 177, (2010), pp. 107-113.
- 31) H. Suzuki, M. Okada, W. Asai, H. Sumiya, K. Harano, Y. Yamagata and K. Miura: Micro milling tool made of nano-polycrystalline diamond for precision cutting of SiC, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 66, No. 1 (2017), pp. 93-96.
- 32) A. Yui, T. Kitajima, H. Sumiya and K. Harano: Study on micro V-groove face turning of cobalt-free tungsten carbide using diamond tools, *J Jpn. Soc. Abras. Technol.*, Vol. 58, No. 10 (2014), pp. 637-643.
- 33) A. Kubo, Y. Mochida, J. Tamaki, K. Harano, H. Sumiya and A. M. M. S. Ullah: Wear characteristics of various diamond tools in cutting of tungsten carbide, *Advanced Materials Research*, Vol. 325, (2011), pp. 153-158.
- 34) 天元祥文, 吉田昌史, 仙波卓弥, 角谷均: ナノ多結晶ダイヤモンド製ノーズ R バイトに対するレーザー成形技術, *日本機械学会論文集(C編)*, Vol. 78, No. 794 (2012), pp. 253-263.
- 35) 宮沢肇, 村川正夫: ダイヤモンドのレーザー加工, *砥粒加工学会誌*, Vol. 45, No. 1 (2002), pp. 21-24.

- 36) 大村悦二, 原野佳津子, 綿谷研一, 江畑恵司: 単結晶ダイヤモンドのレーザー加工メカニズムに関する研究, 年時大会講演論文集, Vol. 4, (2009), pp. 209-210.
- 37) 霜田光一: 20世紀のレーザー史, レーザー研究, Vol. 29, No. 1 (2001), pp. 28-36.
- 38) 難波進, 金弼鉉: レーザー加工, 溶接学会誌, Vol. 34, No. 1 (1965), pp. 16-22.
- 39) 小林昭: レーザー加工, 精密機械, Vol. 47, No. 12 (1981), pp. 1536-1540.
- 40) A. K. Dubey and V. Yadava: Laser beam machining -A review, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 48, No. 6 (2008), pp. 609-628.
- 41) 藤田雅之, 橋田昌樹: フェムト秒レーザー加工, Journal of Plasma and Fusion Research Vol.81, Suppl. (2005), pp. 195-201.
- 42) 熊谷寛: フェムト秒レーザー加工, 応用物理, Vol. 67, No. 9 (1988), pp.1051-1055.
- 43) R. Srinivasan, E. Sutcliffe and B. Braren: Ablation and etching of polymethylmethacrylate by very short (160 fs) ultraviolet (308 nm) laser pulses, Appl. Phys. Lett., Vol. 51, No. 1285 (1987), pp. 1285-1287.
- 44) 塚本雅裕, 橋田昌樹: 金属材料へのフェムト秒レーザー加工, 溶接学会誌, Vol. 72, No. 8 (2003), pp. 622-625.
- 45) 小原實: フェムト秒レーザーによる精密プロセッシングの研究動向と将来展望, 精密工学会誌, Vol. 72, No. 8 (2006), pp. 943-946.
- 46) S. Ameer-Beg, W. Perrie, S. Rathbone, J. Wright, W. Weaver and H. Champoux: Femtosecond laser microstructuring of materials, Applied Surface Science, Vol. 127-129, (1998), pp. 875-880.
- 47) S.I. Anisimov and B. Rethfield: Theory of ultrashort laser pulse interaction with a metal, NLMI-9, Vol. 3093, (1997), pp. 192-203.
- 48) X. Liu, D. Du and G. Mourou: Laser ablation and micromachining with ultrashort laser pulses, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 33, No. 10 (1997), pp. 1706-1716.

- 49) 久保明彦, 餅田恭志, 田牧純一, 原野 佳津子, 角谷均, ウラシヤリフ:超硬合金切削における各種ダイヤモンドバイトの摩耗特性, 砥粒加工学会誌, Vol. 55, No. 10 (2011), pp. 593-600.
- 50) 沖田泰彦, 久木野暁, 深谷朋弘:高耐摩耗性, 高強度ダイヤモンド焼結耐 DA1000 の開発, SEI テクニカルレビュー, Vol. 172, (2008), pp. 96-99.
- 51) 住友電工ハードメタル株式会社:製品情報 超硬素材 超硬合金板材素材カタログ, https://www.sumitool.com/products/carbide-materials/assets/pdf/SS_36.pdf, (参照日 2019年7月8日)
- 52) X. Cheng, K. Nakamoto, M. Sugai, S. Matsumoto, Z. G. Wang and K. Yamazaki: Development of ultra-precision machining system with unique wire EDM tool fabrication system for micro/nano-machining, Annals of CIRP, Vol. 57, No. 1 (2008), pp. 415-420.
- 53) R. Leach: Optical measurement of surface topography, Springer, (2011), pp. 107-129.
- 54) 原野佳津子, 佐藤武, 角谷均, 久野木暁:ナノ多結晶ダイヤモンドの切削性能, SEI テクニカルレビュー, Vol. 177, (2010), pp. 107-113.
- 55) K. Harano, T. Satoh and H. Sumiya: Cutting performance of nano-polycrystalline diamond, Diamond and Related Materials, Vol. 24, (2012), pp. 78-82.
- 56) K. Katahira, S. Takesue, T. Watanabe and J. Komotori: Micro-milling characteristics of silicon carbide and technique for reconditioning of polycrystalline diamond tool surface, J Jpn. Soc. Abras. Technol., Vol. 58, No. 9 (2014), pp. 577-582.
- 57) K. Katahira, S. Takesue, J. Komotori and K. Yamazaki: Micromilling characteristics and electrochemically assisted reconditioning of polycrystalline diamond tool surfaces for ultra-precision machining of high-purity SiC, CIRP Annals –Manufacturing Technology, Vol. 63, No. 1 (2014), pp. 329-332.
- 58) 角谷均, 入船徹男:ナノ多結晶ダイヤモンド(NPD)の DAC への応用, 高圧力の科学と技術, Vol. 21, No. 4 (2011), pp. 285-291.
- 59) K. Ikeda and H. Sumiya: Optical properties of ultrapure nano-polycrystalline diamond, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 55, No. 120306 (2016), pp. 1-4.

- 60) 長田実, 垣花真人: ラマン分光法による炭素材料の評価-最近の測定技術とナノカーボンへの応用-, 炭素, Vol. 2007 Issue, No. 228 (2007), pp. 174-184.
- 61) 大藤弘明, 奥地拓生, 小竹翔子, 鍵裕之, 長友正平, 菅田充, 角谷均: ダイヤモンドのレーザー加工表面の微細組織・構造観察, 日本鉱物学会 2008 年年会講演要旨集, R6-P08.
- 62) S. Odake, H. Ohfuji, T. Okuchi, H. Kagi, H. Sumiya and T. Irifune: Pulsed laser processing of nano-polycrystalline diamond: A comparative study with single crystal diamond, Diamond and Related Materials, Vol. 18, (2009), pp. 877-880.
- 63) T. Okuchi, H. Ohfuji, S. Odake, H. Kagi, S. Nagatomo, M. Sugata and H. Sumiya: Micromachining and surface processing of the super-hard nano-polycrystalline diamond by three types of pulsed laser, Applied Physics A, Vol. 96, (2009), pp. 833-842.
- 64) A. Borghesi and G. Guizzetti: Handbook of Optical Constants of Solids, (1991), pp. 449-460.
- 65) D. Suzuki, F. Itogawa, K. Kawata, T. Suganuma and T. Nakamura: Edge Sharpening and Surface Modification of PcBN Cutting Tool by Pulsed Laser Grinding, Key Engineering Materials, Vol. 523-524, (2012), pp. 131-136.
- 66) B. Tan and K. Venkatakrishnan: A femtosecond laser-induced periodical surface structure on crystalline silicon, J. Micromechanics and Microengineering, Vol. 16, (2006), pp. 1080-1085.
- 67) A. M. Ozkan, A. P. Malshe, T. A. Railkar and W. D. Brown: Femtosecond laser-induced periodic structure writing on diamond crystals and microclusters, Applied Physics Letters, Vol. 75, No. 23 (1999), pp. 3716-3718.
- 68) Q. Wu, Y. Ma, R. Fang, Y. Liao and Q. Yu: Femtosecond laser-induced periodic surface structure on diamond film, Applied Physics Letters, Vol. 82, No. 11 (2003), pp. 1703-1705.
- 69) C. Momma, S. Nolte, B. N. Chichkov, F. v. Alvensleben and A. Tünnermann: Precise laser ablation with ultrashort pulses, Applied Surface Science Vol. 109/110, (1997), pp. 15-19.
- 70) J. Reif: Basic Physics of Femtosecond Laser Ablation, Laser-Surface Interactions for New Materials Production, Vol. 130, (2009), pp. 19-41.

71) 佐々木孝友:各種レーザーの現状と将来, レーザー研究, Vol. 21, No. 1 (1993), pp. 87-90.

72) 依田功:偏光板の光学と応用(その2), 照明学会雑誌, Vol. 42, No. 2 (1958), pp. 48-52.

関連文献

1. 原著論文

- (1) Y. Ogawa, K. Nakamoto, M. Ota, T. Fukaya, M. Russell, T. Zohdi, K. Yamazaki and H. Aoyama: A study on machining of binder-less polycrystalline diamond by femtosecond pulsed laser for fabrication of micro milling tools, *Annals of CIRP*, Vol. 65, No. 1 (2016), pp. 245-248.
- (2) 小河誉典, 片平和俊, 島田浩之, 山崎和雄, 青山英樹: ナノ多結晶ダイヤモンドエンドミルの超硬合金加工性とフェムト秒レーザーによる工具成形, 砥粒加工学会誌 (採択決定).

2. 国際会議

- (1) Y. Ogawa, K. Katahira, H. Shimada, K. Yamazaki and H. Aoyama: A comparative study on micro machining of super fine grain tungsten carbide by various micro PCD ball end-milling tools, ISFA, Kanazawa, Japan, (2018).