

## フェムト秒レーザーのファイバー伝送システムの開発 ならびに超硬合金に対するレーザー加工技術の開発

研究報告者 天本 祥文

### プロフィール



最終学歴 平成 17 年 3 月  
福岡工業大学大学院 工学研究科  
物質生産システム工学専攻 単位取得退学  
専門分野 生産工学・加工学(特殊加工・超精密加工)  
学 位 博士(工学)  
所属団体 福岡工業大学 工学部  
知能機械工学科  
役 職 名 准教授

### 今後の抱負

2006 年より、巡り合わせでレーザー加工の研究を始めて 13 年が経過しました。当時は、企業の皆様からレーザーの導入の敷居の高さを懸念するお話しをよく拝聴しました。技術が進んでレーザーの価格は当時の 10 分の一程度まで下がり、今では様々な企業様がレーザー加工機を販売する時代になってまいりました。最近ではレーザーに関する相談をお受けすることも多くなりました。これまでの経過を振り返ると、研究者として私たちがやるべきことは、必要なときに新しい知識を提供できるように研究を進めることではないかと考えるようになりました。今後も難加工材の加工、切削や研削では難しい形状の加工など、必要とされたときにすぐに提案できるようレーザー加工の技術を発展させていきたいと考えています。

## 1. はじめに

1917年にアインシュタインがレーザーの基礎概念である『光の誘導放出論』を提唱し、1960年に米国の物理学者セオドア・メイマンによる固体ルビーを使った初の可視光線でのレーザー発振が成功してから現在にいたるまで、ほぼ半世紀近い歴史の中で様々なレーザーが発明されてきた。1980年代後半から、極短光パルス発生とその増幅に関する技術が急速に発展し、現在ではフェムト秒の領域からアト秒の領域に到達しようとしている。

パルス幅が10 ps以下のレーザーは、加工対象への熱によるダメージが少ないため、熱変成を伴わない微細加工のツールとして注目されており、研究・開発が活発に行われている<sup>(1,2)</sup>。しかし、ナノ秒パルスレーザー源の分野では、特にファイバーベースのシステムが広く確立されているが、ピコ秒やフェムト秒といった極短光パルスをファイバー伝送できるシステムが確立されていないため、レーザーのセットアップは、比較的大きなセットアップベースを必要とし、工作機械の運動による振動の影響を受けやすくなっているのが現状である。

極短光パルスを用いたレーザー加工技術は、極短光パルスを用いたレーザー加工の微細精度と、非侵襲および非熱アブレーション特性によって、既存の自動車、マイクロエレクトロニクス、眼科市場から新しいプラスチックエレクトロニクスや顕微手術までの幅広いアプリケーションに変革的な影響を与えてきた。

こうした印象的な潜在能力にもかかわらず、極短光パルスレーザーは標準的なソリッドコア光ファイバーを用いて加工対象物に供給するとその完全性は損なわれ、パルス幅が長くなるといった問題があった。

そこで、ファイバー伝送時に問題になる波長変換を起こさずに、エネルギーのロスなく極短光パルスレーザーを伝送できる新しいファイバー伝送系や光学系を開発し、その加工特性を調査することを試みた。

## 2. フェムト秒レーザー光のファイバー伝送システム

### 2.1 レーザ加工の熱影響

図1に示しているのは、レーザー加工の熱影響を表した模式図である。一般的な加工用のナノ秒レーザーではレーザーのエネルギーが熱となり、材料を熔融・気化させ、さらに材料が集光点近傍でプラズマ化し、熔融した材料を排出<sup>(2,3)</sup>する。しかし、熔融した材料の一部は排出されず、熔融物や熱変質層として加工面にとどまるといった問題がある。

一方、近年研究が盛んに行われているフェムト秒やピコ秒といった超短パルスレーザーは、1回の照射時間が極端に短いため、材料が熔融する前に冷却される。つまり、長短パルスレーザーを用いたレーザー加工は熱加工ではなく、固体構成物質が原子、分子、プラズマ状態となって爆発的に放出されるレーザーアブレーションを利用した加工法<sup>(3)</sup>である。

フェムト秒パルスレーザーを用いた場合、ナノ秒パルスファイバーレーザーでは熔融物を効果的に加工面から排出できずに断念せざるを得なかった、超硬合金に対するレーザー加工が可能であると考えられた。

## 2.2 レーザ加工装置

図2に示しているのは、実験に使用したレーザ加工装置の外観である。工作機械には、位置決めならびに送り運動に対する制御分解能が 10 nm である超精密小形工作機械(牧野フライス製作所製, Hyper 2)を使用した。レーザ発信器には、波長が  $1028 \pm 5 \text{ nm}$ , パルス幅が  $290 \text{ fs} \sim 10 \text{ ps}$ , 最大出力が 4W ならびに最大繰返し周波数が 1 MHz のワンボックス型高出力フェムト秒レーザ(Light conversion 製, CARBIDE)を使用した。レーザ光を集光させるための光学系と工作物表面を観察するための光学系を組み込んだ鏡筒をマシニングセンタのコラムに取り付けることでレーザを機械走査させるだけでなく、加工中の表面を観察できる構造になっている。工作物となる超硬合金は、真ちゅう製の治具に取り付けられ、ゴニオステージを介してマシニングセンタのテーブルに固定した。

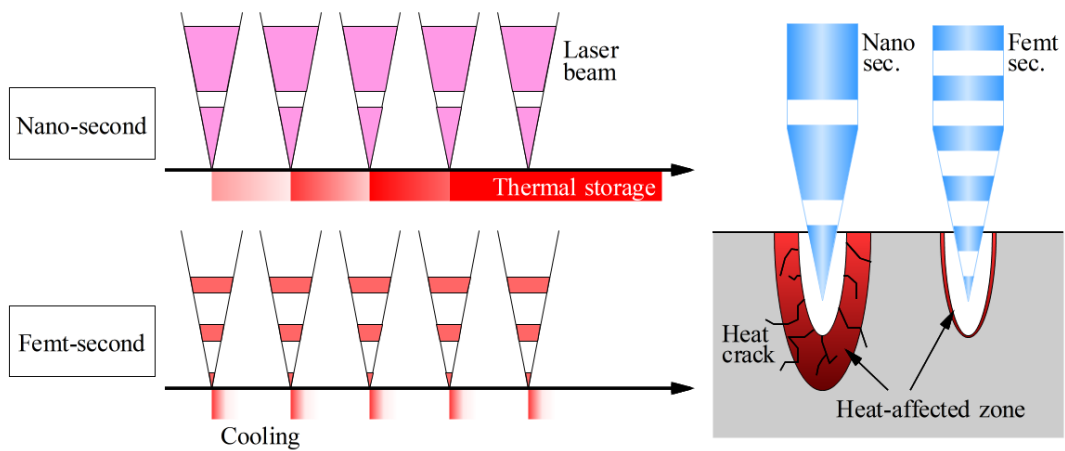
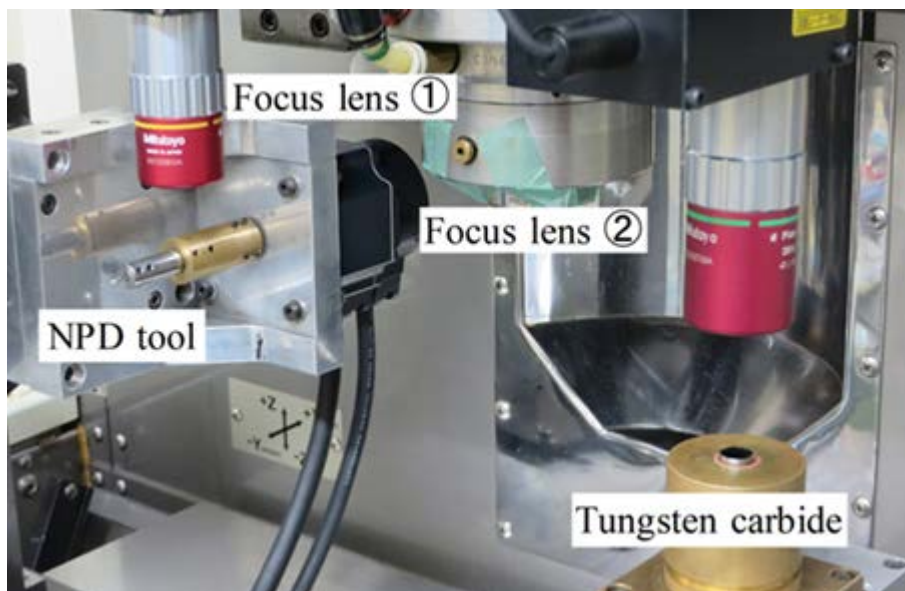


図1 レーザ加工における熱影響



① ナノ秒パルスファイバーレーザ, ② フェムト秒パルスレーザ

図2 レーザ加工装置の外観

工作機械の直進・円弧運動を用いるため、市販のCAD/CAMで計算した加工パスを用いて形状加工を行えるようになっている。

### 2.3 フェムト秒パルスレーザーのファイバー伝送システム

工作機械の直進・円弧運動を利用してレーザー加工を行うためには、レーザー光を発信器から工作機械に取り付けた光学系まで伝送する必要がある。しかし、現状ではフェムト秒パルスレーザーのような極短光パルスレーザーをファイバー伝送することができず、一般的な工作機械にレーザー加工を行うためにはレーザー本体を直接コラムに取り付ける必要がある。そのため、装置の大型化だけでなく、レーザー本体が機械の振動の影響を受けるといった問題があった。

図3に示しているのは、フェムト秒パルスレーザーをファイバー伝送する際に生じる問題点を模式図で表したものである。レーザーの伝送に一般的に用いられるガラスファイバーでフェムト秒パルスレーザーを伝送した場合、以下に示す4つの問題が考えられる。

1. 高次分散によるパルス幅の拡大<sup>(4)</sup>
2. 非線形光学効果による波長変化<sup>(5)</sup>
3. 多光子吸収による透明絶縁体でのレーザー光の吸収<sup>(6)</sup>
4. 集光点でのレーザー誘起プラズマの発生<sup>(7)</sup>

幸い、極短光パルスレーザーの進歩と並行してフォトニック結晶ファイバー(PCF)の分野から新たに極短光パルスレーザーを伝送できるホローコアフォトニック結晶ファイバー(HC-PCF: Hollow Core Photonic Crystal Fiber)が登場した<sup>(8,9)</sup>。HC-PCFはファイバーコアを中空にただけでなく、小径の中空ファイバーが格子状に配置されている構造からハイポサイクロイド輪郭コアと呼ばれる。中空ファイバーは負曲率状の形をしており円形的な輪郭に比べて空間的な重なりが減り、損失が少なくなるだけでなく、計算された格子状の配置により波長変化やパルス幅の増大を抑制することができるという特徴を持っている。

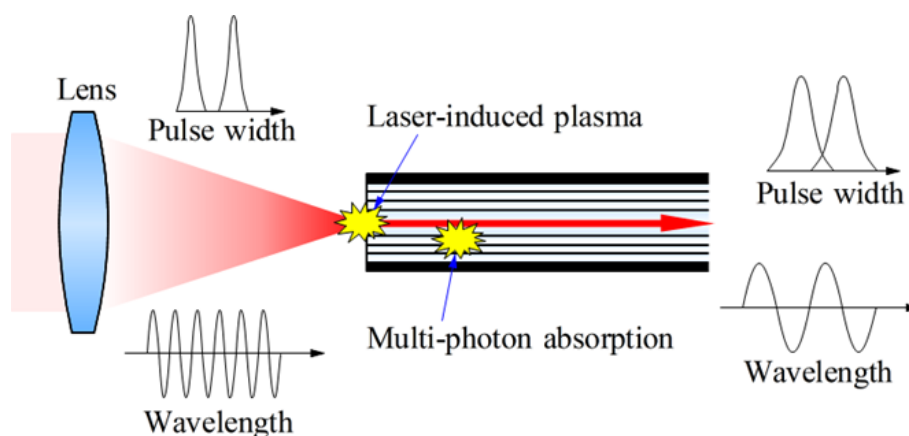


図3 フェムト秒パルスレーザーをファイバー伝送する際に生じる問題点

そこで、上記1~3の問題を解決するために、フェムト秒パルスレーザーの伝送にはカゴメ格子ホローコアフォトニック結晶ファイバー(GLOphotonics 製, Kagome-Cladding Hollow Core Photonic Crystal Fiber)を使用した。また、上記4の問題を解決するために中空ファイバー内を真空状態にし、中空ファイバー内でのレーザー誘起プラズマの発生を抑制できるようにした。図4に示しているのは、ファイバー伝送システムである。

## 2.4 フェムト秒パルスレーザーの出力特性

今回使用したフェムト秒パルスレーザーは、音調光学変調器(AOM: Acousto-Optic Modulator)を用いてレーザー出力を調整できるようになっている。図5に示しているのは、ファイバー伝送システムの真空化を行う前後のパルスエネルギーの比較である。中空ファイバー内部を真空状態にすることで、周波数が60 kHz、AOMが4.5 Vで50  $\mu$ Jのエネルギーを出力することができた。このときのHC-PCFの透過効率は約80%で、フェムト秒パルスレーザーの性能を最大限に発揮できるようになった。

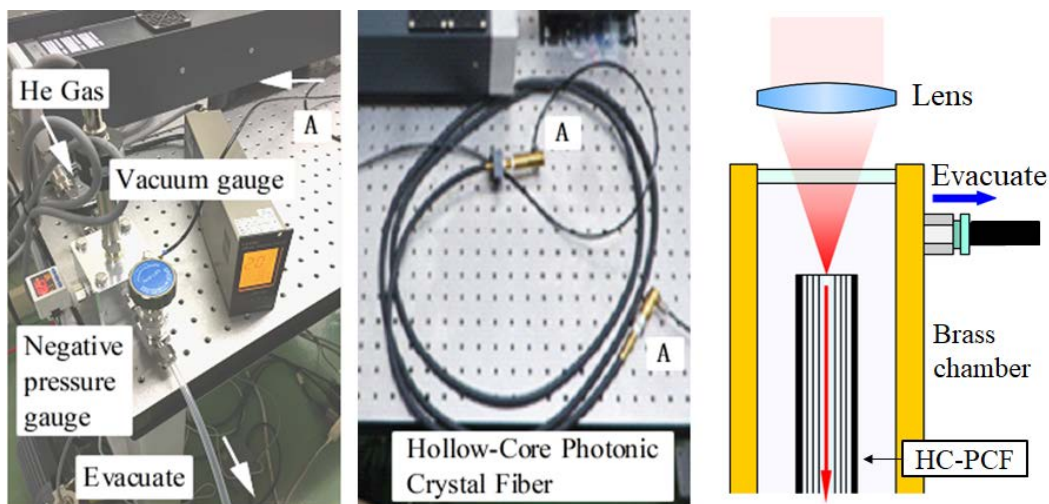


図4 フェムト秒パルスレーザーのファイバー伝送システム

## 3. フェムト秒パルスレーザーを用いた超硬合金に対する微細加工技術

### 3.1 レーザを用いた形状創成のメカニズム

図6に示しているのは、デフォーカス量とZ軸方向の除去深さ $\Delta z$ との関係を示す模式図である。デフォーカス量を0に設定し、完全に削り残しを除去した場合、最大除去量と(Df)maxは等しくなる。しかし、レーザー加工では必ず削り残し $\delta z$ が発生する。レーザーで微細形状を加工するためには、赤線で図示した用に削り残し $\delta z$ を0に近づける必要がある。これは切込み量Ifと除去量 $\Delta z$ が等しくなることを意味しており、削り残しを完全に除去できれば機械加工と同様の方法で微細形状をレーザー加工することができる<sup>(10)</sup>。

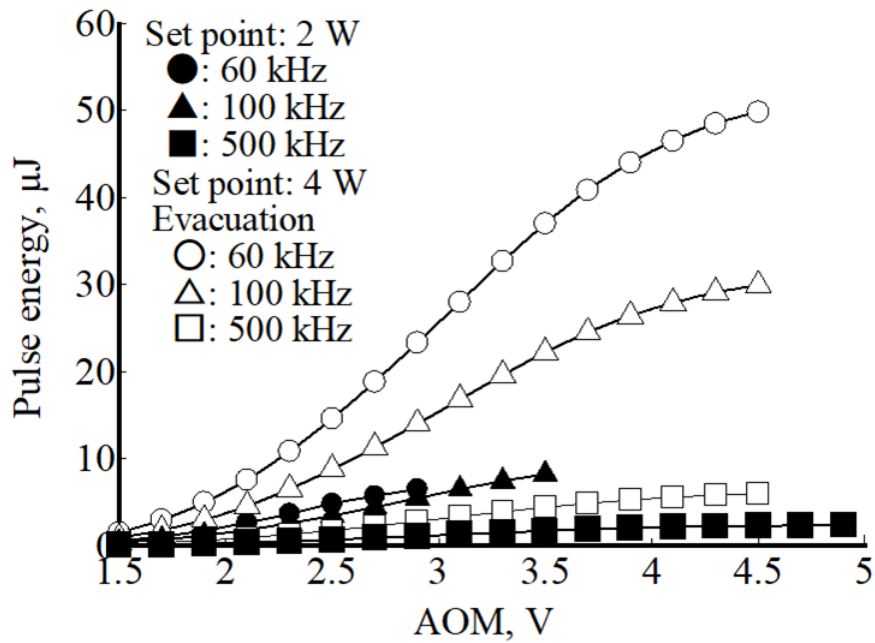


図5 真空化前後のパルスエネルギーの比較

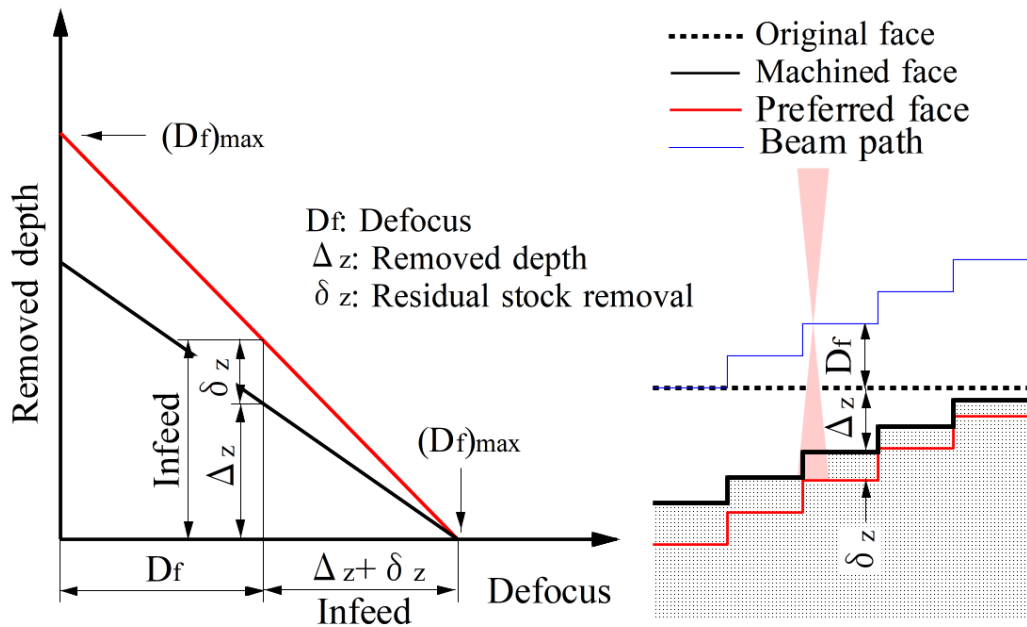


図6 フェムト秒パルスレーザーを用いたレーザー加工のメカニズム

### 3.2 平面状超合金の加工方法

図7に示しているのは、フェムト秒パルスレーザを用いた超合金の加工条件を求めために行った、超合金の平面に対するポケット加工の模式図である。超合金の $\square 0.2\text{ mm}$ の範囲に対してレーザ加工を行った。加工条件を少なくするために、送り方向の打撃間隔 $\Delta P$ と横送り量 $\Delta Z$ を揃えることにした。

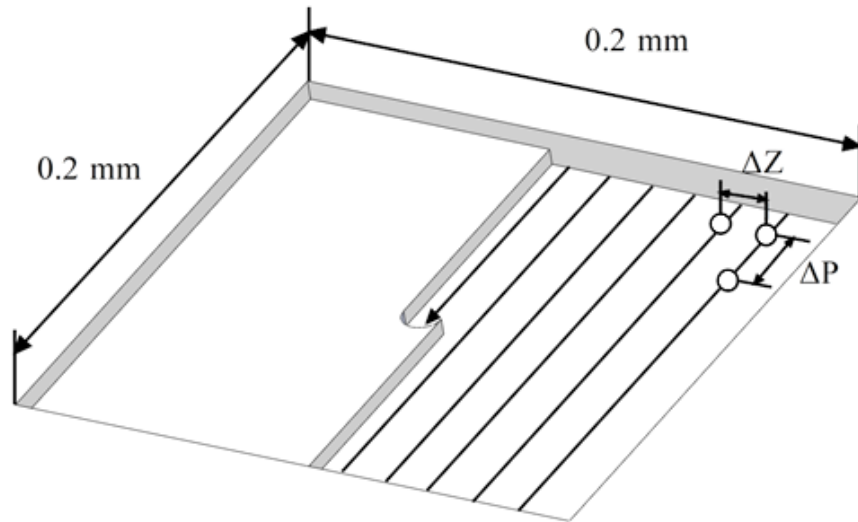


図7 超合金の平面に対するポケット加工の模式図

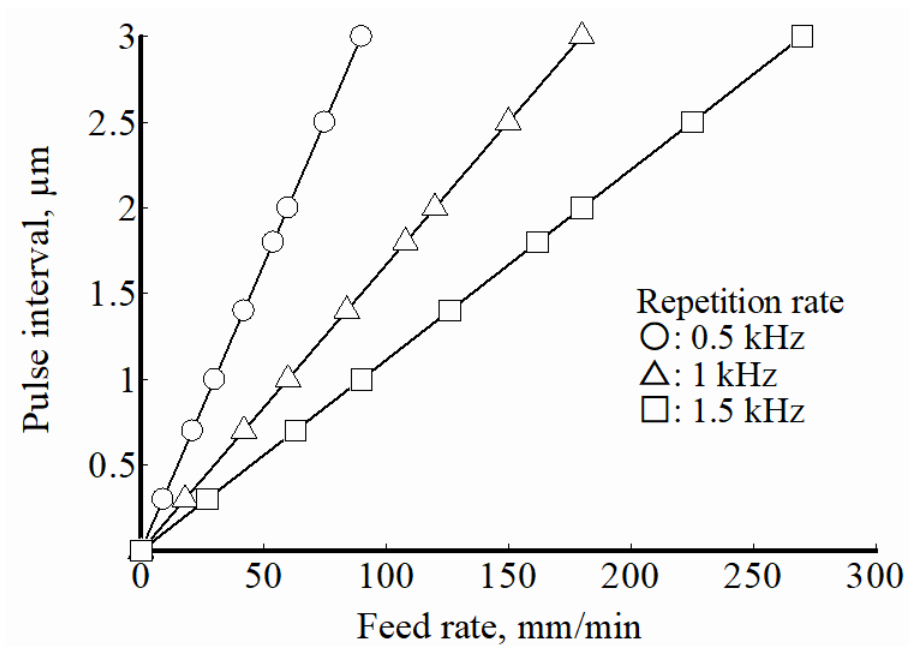


図8 送り速度と打撃間隔の関係

図8に示しているのは、計算より求めた周波数を変化させたときの送り速度と打撃間隔の関係である。工作機械の追従限度が100mm/min程度であるため、100mm/min以下の送り速度で打撃間隔の制御範囲が広い周波数0.5kHzを使用することにした

図9に示しているのは、打撃間隔と除去能率の関係である。除去深さが最大となった打撃間隔0.7μmのとき除去能率は最も高くなったため、以降の実験では打撃間隔を0.7μmに設定することにした。

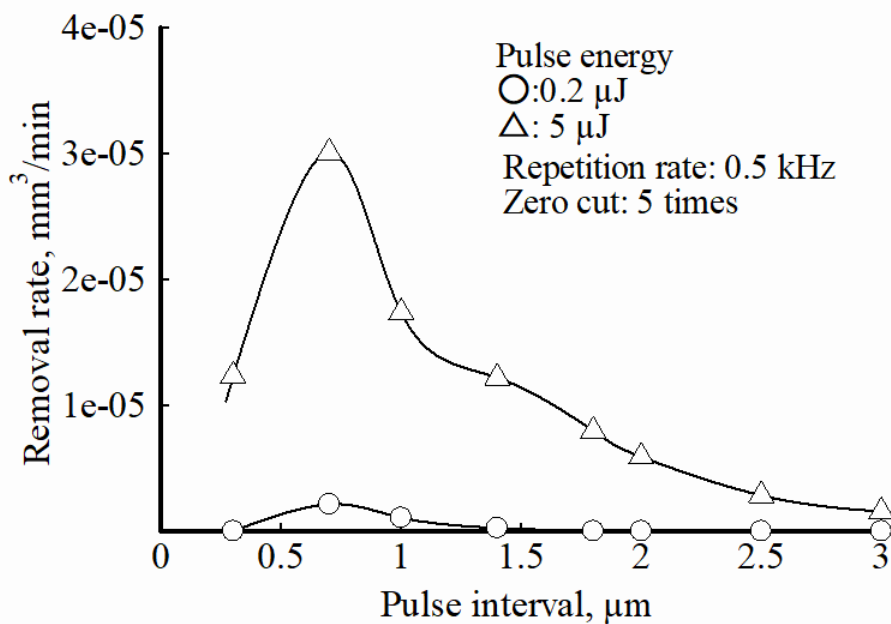


図9 打撃間隔と除去能率の関係

### 3.3 デフォーカスと除去深さ

焦点位置から上方にデフォーカスさせると焦域が広がり、エネルギー密度が下がるため除去深さが浅くなる。そこで、デフォーカスを利用して除去深さを制御するために、デフォーカス量と除去深さの関係を求める実験を行った。また、基準面に対して1回目の加工を行ったときの除去深さと加工後の表面に対して2回目の加工を行ったときの除去深さを確認し、除去深さを制御できるかどうかを確認するために、2段加工実験を行った。

図10に示しているのは、2段加工実験で得られたデフォーカス量と除去深さの関係である。デフォーカス量が0、40ならびに60μmの3点で2段加工実験を行った。削り残しが無くなれば、最大デフォーカス量と最大除去量は等しくなるはずであるが、完全に削り残しを除去できていないため除去深さが浅くなっている。しかし、基準面に対して一回目の加工を行ったときの除去深さと加工後の表面に対して二回目の加工を行ったときの除去深さに差は無く、繰り返し加工を行っても除去深さを制御できることが確認できた。



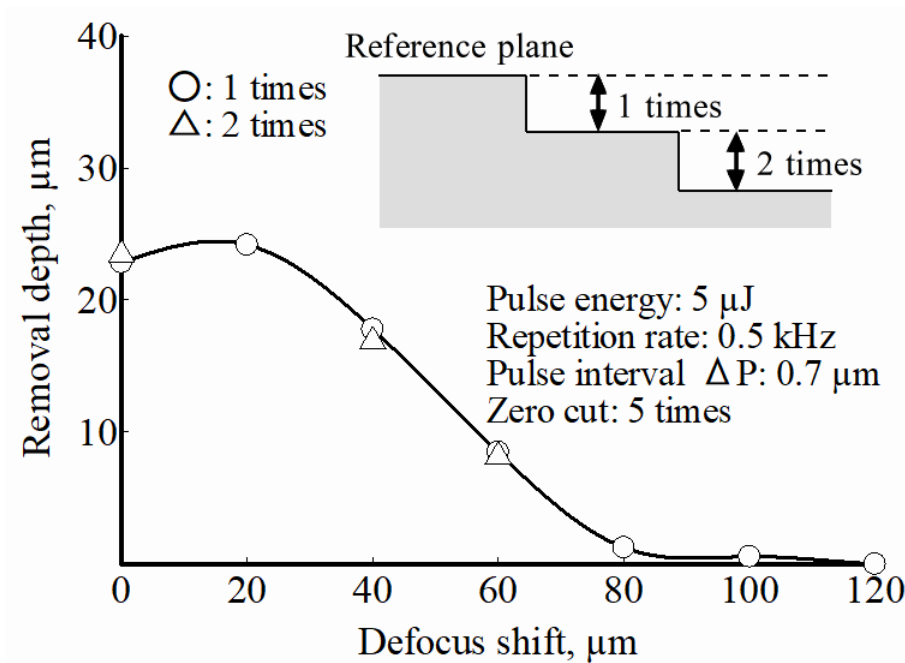


図10 2段加工を行ったときのデフォーカス量と除去量の関係

### 3.4 凸状ディンプルのテスト加工

基礎実験の結果をもとに、超硬合金に対してレーザー走査加工法を用いて三次元微細形状を加工できるかどうかを確認するため、直径が0.2 mmの1個の凸状ディンプルを加工した。表1に示しているのは凸状ディンプルの加工条件である。図11に示しているのは、CAD/CAMで計算された加工パスをZ方向の負の方向に順次切込むといったレーザー走査加工法を用いて加工した、直径が0.2 mmの9個の凸状ディンプルである。フェムト秒パルスレーザー特有の周期微細構造が生じているため、加工面は粗いく、9個の凸状ディンプルを加工するのに約36時間要したが、フェムト秒パルスレーザーを用いて超硬合金に対して、三次元微細加工できることが確かめられた。

表1 レーザ走査加工法を用いた凸状ディンプルの加工条件

Polarizer	Straight
Lens	×20
Energy	5 $\mu$ J
Repetition rate	1.5 kHz
Defocus	70 $\mu$ m
Number of zero cut	5 times
Feed rate	63 mm/min
Cross feed	0.7 $\mu$ m
Pulse interval	0.7 $\mu$ m
Depth of cut	10 $\mu$ m
Assist air	0.4 MPa (Vertical)

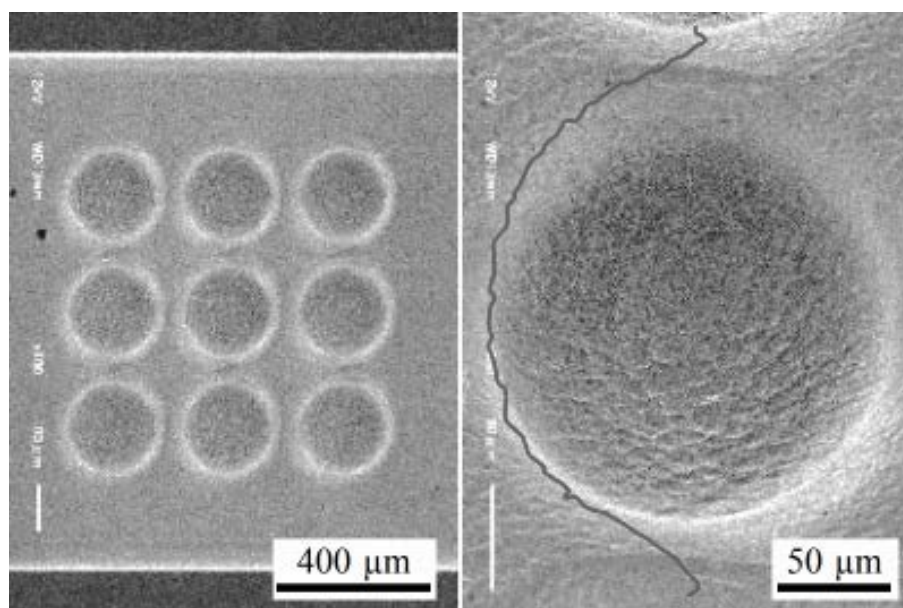


図11 フェムト秒パルスレーザーで加工した直径が0.2 mm, 高さが0.1 mmの9個の凸状ディンプル

#### 4. 超硬合金に対する仕上げ加工方法の検討

粗加工で生じる微細周期構造を除去するために、仕上げ加工条件を決めるための実験を行った。仕上げ加工で使用する最適なパルス幅を求めるために、パルス幅を変化させて加工を行った。

図 12 に示しているのは、パルス幅を変化させて加工を行ったときの、打撃間隔と表面粗さの関係である。表面粗さ  $R_z$  は、10 ps のとき 1 ps ならびに 300 fs に比べて小さくなった。

そこで、表面粗さが最も小さくなった、仕上げ加工のパルス幅は 10 ps に設定することにした。

図 13 に示しているのは、打撃間隔を変えた場合の加工面の SEM 画像である。周波数 0.5 kHz、ゼロカット回数 0 回ならびにパルスエネルギー 20  $\mu\text{J}$  でレーザー加工を行った。

打撃間隔が狭すぎる場合、図 13(a)に示すように加工面に熱がこもり熔融した。図 13(a)より打撃間隔を若干広くした場合、図 13 (b)に示すように加工面には微細周期構造が発生した。打撃間隔が適度な場合、図 13 (c)に示すように微細周期構造が発生せず加工面は平滑であった。打撃間隔が広すぎる場合、図 13(d) に示すようにレーザーの照射跡が観察された。

図 14 に示しているのは、各エネルギーで打撃間隔を変化させたときの加工表面状態の分布を表にしたものである。エネルギーが大きくなると照射範囲が大きくなるため、微細周期構造の発生しない打撃間隔の広がった。この表から得られた適度な打撃間隔の条件を用いて、周期構造が生じた加工面に対して仕上げ加工を行い、周期構造を除去できるか確かめる実験を行った。

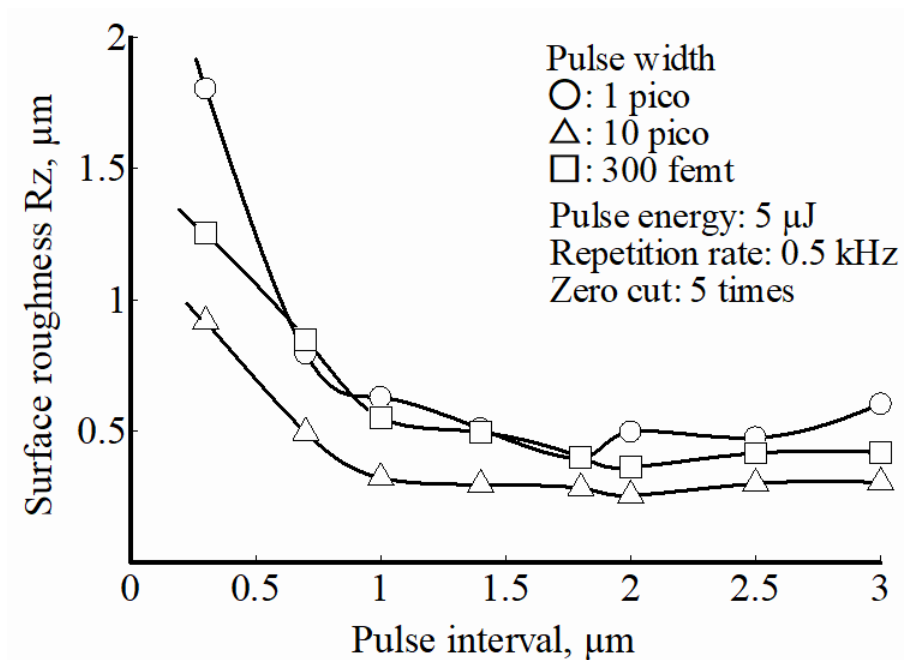


図 12 パルス幅を変化させた場合の打撃間隔と表面粗さの関係

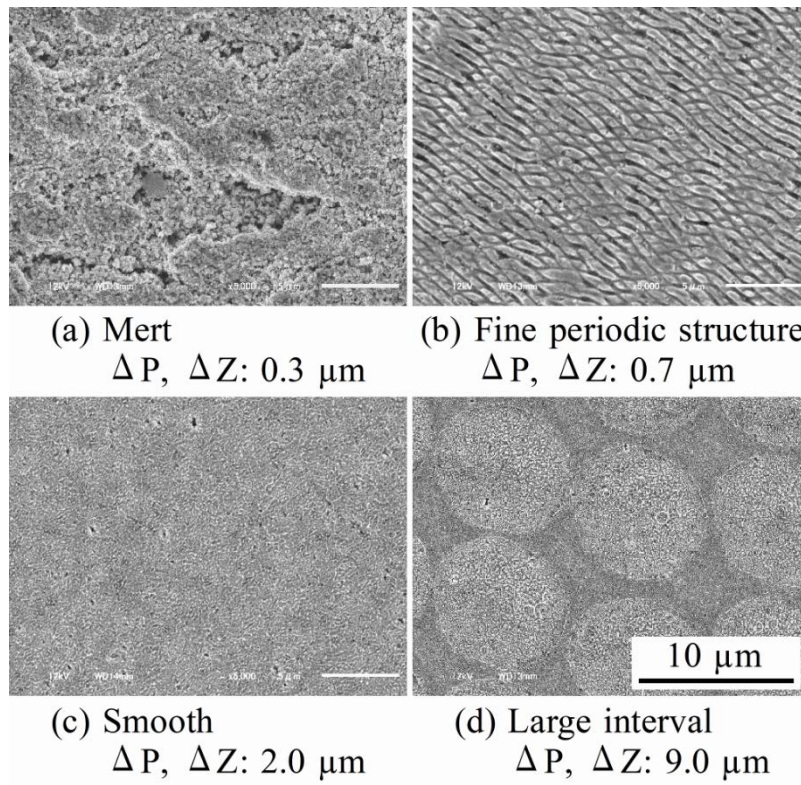


図 13 エネルギーと打撃間隔を変えたときの加工表面の状態

		Pulse interval $\Delta P, \mu\text{m}$																	
		0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.6	2.8	3	3.2	3.4	3.6	3.8	4
Pulse energy, $\mu\text{J}$	0.5	○	○	○	○	○	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲					
	0.6	○	○	○	○	○	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲					
	0.7	●	●	○	○	○	○	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲					
	0.8	●	●	○	○	○	○	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲					
	0.9	●	●	●	○	○	○	○	▲	▲	▲	▲	▲	▲					
	1	●	●	●	●	○	○	○	○	▲	▲	▲	▲	▲					
	1.1	●	●	●	●	○	○	○	○	▲	▲	▲	▲	▲					
	1.2	●	●	●	●	●	○	○	○	○	▲	▲	▲	▲					
	1.3	●	●	●	●	●	○	○	○	○	▲	▲	▲	▲					
	1.4	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	▲	▲	▲					
	1.5	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	▲	▲					
	2	●	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	▲					
	4				●	●	●	●	○	○	○	○	○	▲					
	6				●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	▲	▲	▲	▲
8				●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	▲	▲	▲	
10	■			●	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	▲	▲	▲	
20	■	■	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	▲	▲	

Mert
  Fine periodic structure
  Smooth
  Large interval

図 14 加工表面の状態の分布

図 15 (a)に示すような微細周期構造が発生している粗加工面に対して、微細周期構造が発生しない適度な打撃間隔で仕上げ加工を行った。図 15 (b)に示すように、適切なパルスエネルギーと打撃間隔で仕上げ加工を行うと微細周期構造を除去できることが明らかになった。

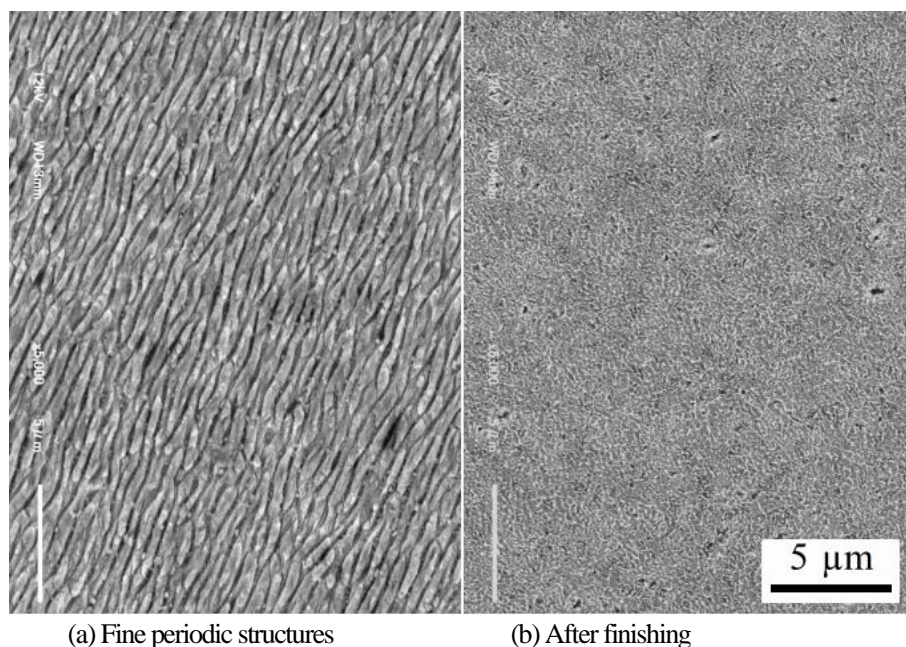


図 15 微細周期構造が形成された加工面に対して  
仕上げ加工を行った後の加工面のようす

## 5. 形状加工の高精度化と加工面の平滑化

### 5.1 レンズ倍率

図 13(c)で示すような平滑な加工面を成形できる加工条件は、除去量が  $1\mu\text{m}$  以下しかないため、図 11 のディンプルの縁に生じているようなダレ極力小さくする必要があった。レンズの倍率を高倍にすると焦点深度が浅くなるため、レーザー光の焦点位置と集光レンズの距離は小さくなり、レーザー加工できるデフォーカス量は小さくなる。また、レーザーのスポット径が小さくなるため加工精度を高くすることができる可能性があった。そこで、レンズ倍率をこれまで使用していた 20 倍から 50 倍ならびに 100 倍に変えてレーザー加工を行いレンズ倍率とデフォーカス量の関係を求めることにした。

図 16 に示しているのは、レンズ倍率を変えた場合のデフォーカス量と除去深さの関係である。最大除去深さ( $\Delta z$ )<sub>max</sub> を最大デフォーカス量(Df)<sub>max</sub> で割った焦点除去率が高いほど、削り残しは少なくなる。これまで使用していた 20 倍のレンズと比べ、100 倍のレンズを用いることで焦点除去率を大きく向上できることが明らかになった。

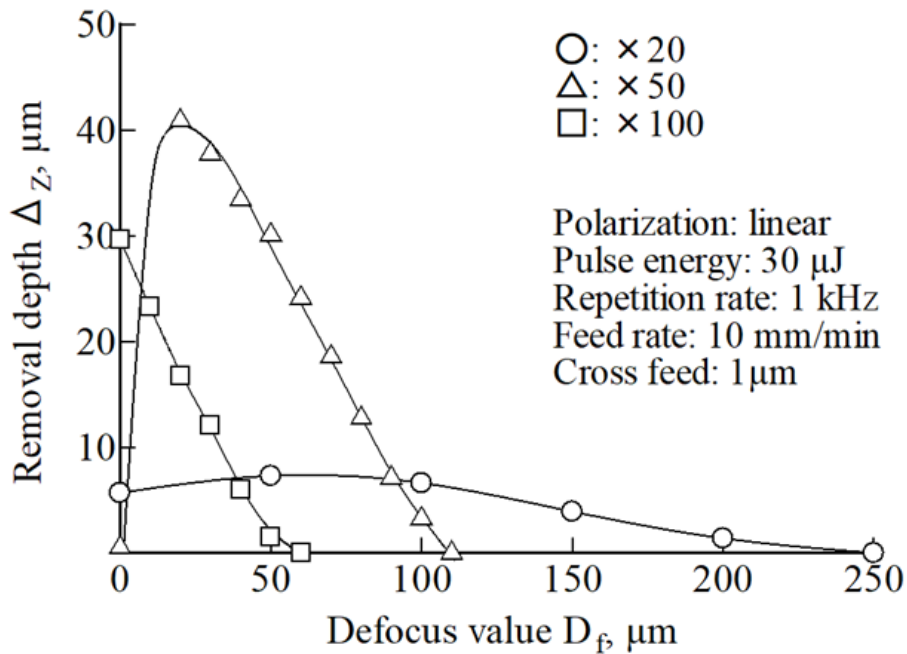


図 16 レンズ倍率を変えた場合のデフォーカス量と除去深さの関係

### 5.2 繰返し周波数を変化させた場合の焦点除去率

繰返し周波数、パルスエネルギーおよびデフォーカス量(Df)を変化させて□100μm のポケット加工を行い、焦点除去率を比較した。このときの横送り量 $\Delta p$ は1μmに設定した。図17に示しているのは繰返し周波数を変化させた場合の焦点除去率である。繰返し周波数fが2.85 kHz、パルスエネルギー $E_p$ が5μJの場合が最も切残しが少ないことが明らかになった。切残しを完全に除去するためには、1度目のレーザ加工面に対して、同じ位置で繰返しレーザ光を走査させるゼロカット加工を行う必要がある。切残しを完全に除去するためにはゼロカットを3回行う必要があることが計算より求められた。そこで、切残しを完全に除去するためにゼロカットを3回行うことにした。

図18に示しているのは、加工面を平滑にするために、パルスエネルギーならびに繰返し周波数を小さくし、低エネルギー密度で加工を行った結果である。段階的にエネルギー密度を低下させることで、加工面の粗さを約0.1μmまで小さくできることが明らかになった。

### 5.3 半割ディンプルのテスト加工

半径が30μmの半割ディンプルの加工を行った。表2に示しているのは、半割ディンプルの加工条件である。図19に示しているのは、CAD/CAMで計算された加工パスをZ方向の負の方向に順次切込むといったレーザ走査加工法を用いて加工した、直径が0.03mmの半割ディンプルである。低エネルギー密度で加工を行い、加工表面へのデブリの付着を防いだことで、平滑かつ形状誤差の少ないディンプルを加工することができた。

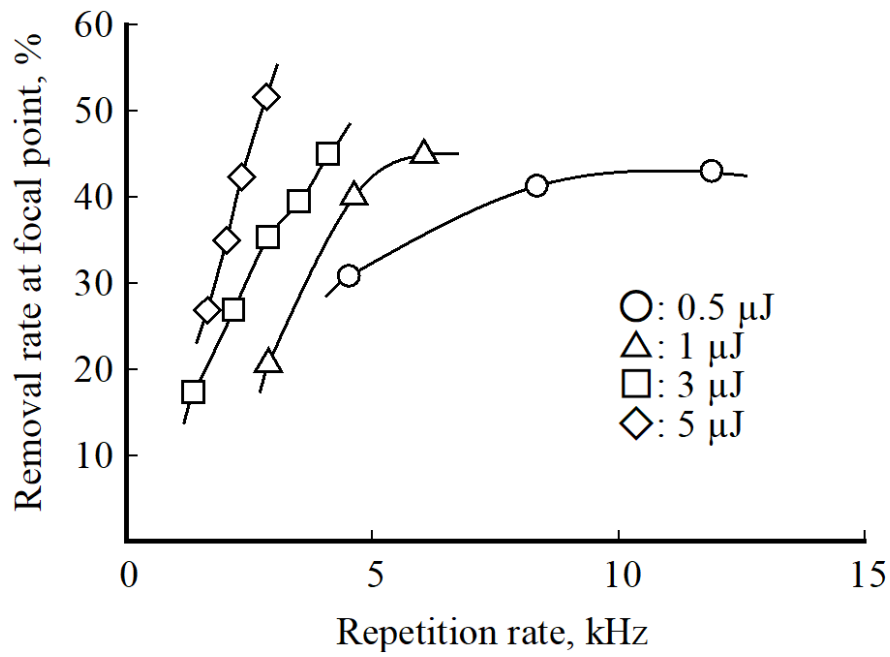


図 17 繰り返し周波数を変化させた場合の焦点除去率

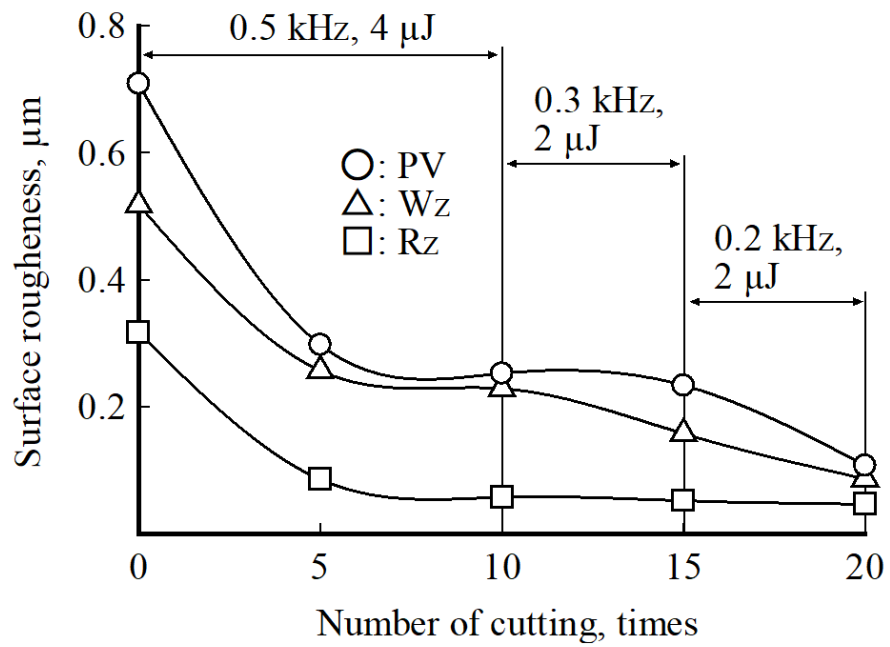


図 18 段階的にエネルギー密度を低下させた場合の加工面の粗さ

表2 半割ディンプルの加工条件

	Shape forming	finishing
Polarizer	Radial	
Lens	×100	
Energy	2 μJ	
Repetition rate	0.3 kHz	0.2 kHz
Defocus	0 μm	
Number of zero cut	5 times	
Feed rate	10 mm/min	
Cross feed	0.5 μm	
Depth of cut	2.4 μm	1 μm
Number of cut	12 times	2 times
Assist air	0.4 MPa(Vertical)	

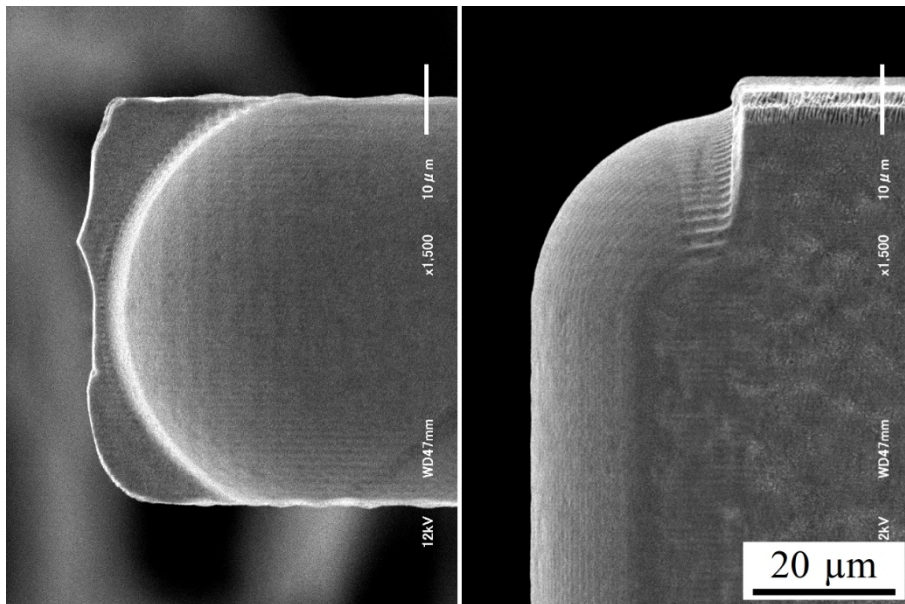


図19 フェムト秒パルスレーザーで加工した直径が0.03 mmの半割ディンプル



## 6. まとめ

本研究では、フェムト秒パルスレーザをレーザ発信器から工作機械に取り付けられた鏡筒までロスなく伝送できるファイバー伝送システムを開発し、超硬合金に対する加工特性を調査することを試みた。本研究より得られた研究の成果は以下のようにまとめられる。

1. 格子状に配置された中空ファイバー内部を真空状態にした HC-PCF を使用することで、フェムト秒パルスレーザをロスなく伝送できるファイバー伝送システムを開発することができた。
2. 切り残しがなくなるまでゼロカット加工を行えば、CAD/CAM を用いてレーザの走査軌跡を計算できる形状であれば、フェムト秒パルスレーザを用いて超硬合金製に対して三次元微細形状を加工できることが明らかになった。
3. パルス幅を 10 ps に設定し、適切な打撃間隔で仕上げ加工を行うことで、表面に生じた微細周期構造を除去できることが明らかになった。
4. 倍率が 100 倍の集光レンズを用いれば、50  $\mu\text{m}$  以下の微細形状であっても十分に加工可能であることが確かめられた。

## 謝辞

本研究は、公益財団法人三井金型振興財団による研究助成により実施されたことを記し、謝意を表す。

## 参考文献

1. 藤田雅之, 橋田昌樹, フェムト秒レーザー加工, プラズマ・核融合学会, Vol. 81(2005), pp. 195-201.
2. 塚本雅裕, 橋田昌樹, 金属最良へのフェムト秒レーザー加工, 溶接学会誌, Vol. 72(2003), No. 8, pp. 622-625.
3. 中奥洋, 超短パルスレーザー加工機による精密加工, Panasonic Technical Journal, Vol. 62, No. 2(2016), pp. 14-19.
4. 監修: 河田聡, 編集: 梅田倫弘, 川田善正, 羽根一博, ナノオプティクス・ナノフォトニクスのすべて-ナノ光技術の基礎から実用まで-, フロンティア出版.
5. 大槻朋子, ファイバ増幅器と波長変換による高効率紫外光源, レーザ研究, Vol. 29, No. 2(2001), pp. 94-98.
6. 堀澤秀之, 安永暢男, フェムト秒レーザーによる微細加工, 電気加工学会誌, Vol. 37, No. 86(2003), pp. 26-33.
7. 古谷博秀, 齊藤剛, レーザー生成プラズマの電離ダイナミクスと構造, J. Plasma Fusion Res. Vol. 84, No. 6 (2008), pp. 362-368.

8. ファタ・ベナビット, フレデリック・ジェローム, ベノイト・デボード, メシヤール・アルハラビ, 超短パルスレーザを極めるカゴメPCファイバ, <http://jadocz.com/doc/580386/.feature>
9. F. Emaury et al., Beam delivery and pulse compression to sub-50 fs of a mode locked thin-disk laser in a gas-filled Kagome-type HC-PCF fiber, *Optics Express*, Vol. 21, Issue 4(2013), pp. 4986-4994.
10. 仙波卓弥, 天本祥文, 角谷均, ナノ秒パルスレーザを用いたナノ多結晶ダイヤモンド製ノーズ R バイトに対する走査線加工技術, *日本機械学会論文集*, Vol. 83, No. 851(2017-7), [DOI: 10.1299/transjsme.16-00573].