

単結晶ダイヤモンド工具による硬脆材料の UV レーザ援用微細加工

由井 明紀*

Micro Cutting of Brittle Material using Monocrystalline Diamond Tool Assisted by UV-laser

Akinori YUI*

1. 緒言

近年実用化が進んでいる高機能製品の主要材料として、硬質性、電気的特性、化学的安定性、熱的特性、透明性などに優れているガラス、セラミックス、サファイアなどの硬脆材料の需要が高まっている。特に、超硬合金はダイヤモンド、立方晶窒化ホウ素に次いで高硬度な材料であり、切削工具や金型等、工業的に幅広い分野で利用されている。従来、超硬合金の精密加工は、ダイヤモンド砥石による研削加工やダイヤモンドバイトによる微細切削加工により比較的 low 効率で行われている。特に切削加工では、工具損耗や工具損傷に起因して加工効率が低く、学術的のみならず産業界からも工具寿命の延長が熱望されている。

硬脆材料の微細加工に関する研究報告は様々なアプローチから成されている。社本らは、工具に超音波を用いた楕円振動を付与した楕円振動切削を提案している¹⁾。超音波振動を付与することにより切りくず厚さが大幅に減少し、研削抵抗も抑制することにより延性モード切削に成功しているが、加工時間が長くなる問題を抱えている。また、角谷らは微粒ダイヤモンドを高温・高圧条件にて焼成することにより、工具損耗を抑制できるナノ多結晶ダイヤモンド工具の商品化に成功した²⁾。これにより、単結晶ダイヤモンド工具と比較し、硬脆材料の高効率・高精度加工をある程度まで可能にしている。さらに、鈴木らは、レーザを用いて単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具を試作し、多刃切削工具による超硬合金製金型の高効率加工に成功している³⁾。

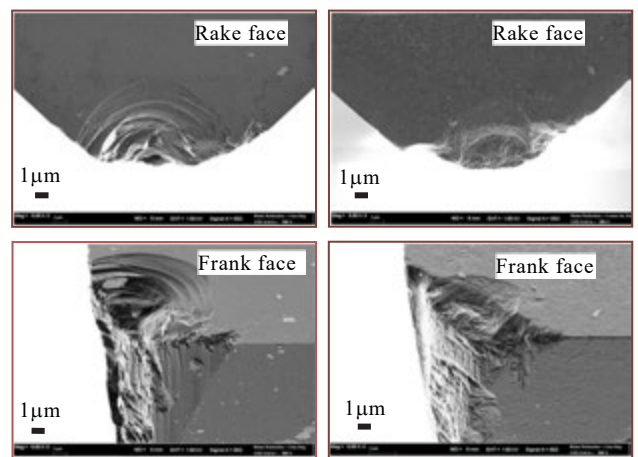
超硬合金の中で、特に結合相量（バインダ）が 1wt% 以下の合金は、バインダレス超硬合金と呼ばれており、高い精度や鏡面性が必要な金型材料として用いられている。バインダレス超硬合金の硬度は HRA93 以上⁴⁾と特に高いため、加工用の工具材質としては、一般にダイヤモンドが使用される。

筆者らは単結晶ダイヤモンドや住友電工が開発中のナノ多結晶ダイヤモンド工具を用いてバインダレス超硬合金のシェーパ加工および溝入れ正面切削を試みたが、工具寿命の十分な延長には至っていない⁵⁾。すなわち、ダイヤモンド工具に図 1 に示すような刃先損耗が発生し、工具材料として実用化に必要な寿命を得るに至っていない^{4)~6)}。さらに、王立ストックホルム工科大学の Peter らが開発

したカーボンナノチューブを混入した植物性油剤を用いて工具と工作物接触面の潤滑性を高めて正面切削を行うことにより、工具寿命の延長に成功したが、実用的な工具寿命には至っていない⁸⁾。

一方レーザ加工では、材料の硬度や破砕性に関係することはなく材料加工することができ、その加工特性はレーザ光の吸収率により左右される。すなわち、使用するレーザ波長と加工する材料の光吸収特性により加工効率は決まる。一方、レーザ加工では、十分な加工面性状を得ることができず、仕上げ研磨加工が必要とされている。

硬脆材料のレーザ加工に関しては、池野らが単結晶 SiC のレーザスライディング加工に関する報告をしている⁸⁾。また、レーザ照射によってガラス内部に生じる現象を解明し⁹⁾、ガラスレンズの製造を試みている¹⁰⁾。いずれの論文でも、レーザで加工した仕上げ面をマ



(a) 単結晶ダイヤモンド工具 (切削距離: 440m) (b) ナノ多結晶ダイヤモンド工具 (切削距離: 3000m)

図 1 ダイヤモンド工具の刃先損耗例

イクロメートルレベルで観察するとその形状が不均一になり、形状

表 1 ダイヤモンドの分類

タイプ	型	特徴	割合
タイプ I 型	Ia 型	窒素が集合体を作る。一般的なダイヤモンドのほとんどが Ia 型	98%
	Ib 型	窒素が単独で存在。濃い黄色系を生む。	
タイプ II 型	IIa 型	窒素やホウ素など不純元素を含まない。全ダイヤモンドの 0.5% 程度	2%
	IIb 型	ホウ素を含む。電気を通す特異な性質がある。	

*教授 機械工学科

Professor, Dept. of Mechanical Engineering

に対する制御性は低い。また、レーザ加工では、一般に熱化学反応により昇華した材料粉によるデブリが発生するため、硬脆材料に微細精密加工をするのは困難である。

本研究では、UV レーザ加工とダイヤモンド切削加工を複合して、硬脆材料を高効率・高精度に微細加工することを目的とする。まず、バインダレス超硬合金に対して UV レーザ加工を試み、レーザ照射面の機械的強度の変化を確認する。次に、表 1 に示す一般的な工具材料に使用される Ia タイプと高純度の IIa タイプのダイヤモンドに対してレーザ加工を試み、レーザ援用工具として使用できるか否かの可能性を確認する。最終目的として、バインダレス超硬合金などの硬脆材料に対して UV レーザを援用したダイヤモンド工具による微細切削加工を試み、援用効果の確認を行う。

2. レーザによる硬脆材料の微細加工

2.1 供試短パルス UV レーザ

供試レーザとして、表 2 に示す Advanced Optwave 製の短パルス UV レーザ (Aonano-355-5-30-V) を用いた。照射される平行光のビーム径 2mm を $10\mu\text{m}$ 以下に集光するため、図 2 に示すように反射ミラー (シグマ光機製, TFM-30C05-352/355)、ビームエキスパンダ (Thorlabs 製 BE02-UVB) と焦点距離 $f=100\text{mm}$ の集光レンズ (シグマ光機製 LA4380-UV-ML) で構成した光学系を組み立てた。本光学系により、焦点距離 $f=149.3\text{mm}$ においてビーム径 $6.72\mu\text{m}$ を得ることができた。

レーザ光の平均出力はデジタルパワーエネルギーメータ (Thorlabs 製, PM100D) にて計測した。図 3 に示すように、平均出力は発振周波数が高くなるほど低くなり、発信周波数 30kHz で最大出力 5.7W を得る。また、光学系 (ミラー&レンズ) を介在することにより、発信周波数が高い 300Hz 付近における出力の減衰はほとんど見られないが、平均出力が高い領域 (発信周波数が低い 30Hz 付近) では 20% 程度減衰し、平均出力の最大値は 4.5W となる。

またレーザ出力を安定させるため、主電源は常に ON とするが、実験開始前には毎回パワーセンサ (Thorlabs 製, S425C) を用いて、発信周波数と平均出力のキャリブレーションを実施し、実験データの再現性を確保する。

2.2 バインダレス超鋼合金の UV レーザによるスポット加工

図 4 に UV レーザを用いて平均出力 4.5W (発信周波数 30kHz) の条件でバインダレス超硬合金に穴加工を施した例を示す。図より、

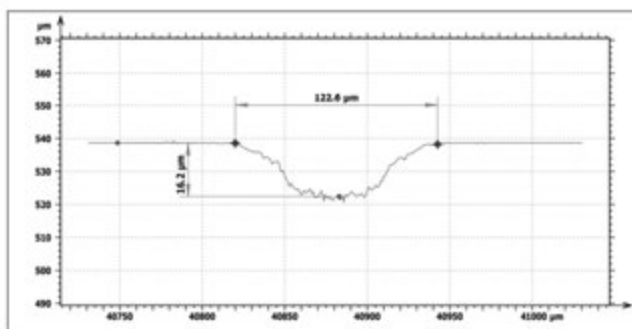


図 4 バインダレス超硬合金レーザ照射部の断面形状と SEM 写真
(照射時間: 5s, 平均出力 4.5W)

表 2 供試 UV レーザの仕様

レーザ型式	Aonano-355-5-30-V(Advanced Optwave 製)
パルス幅	16~68ns
平均出力	0.9~5.7W
波長	355nm
ビーム径	2mm
ビーム真円度	90%

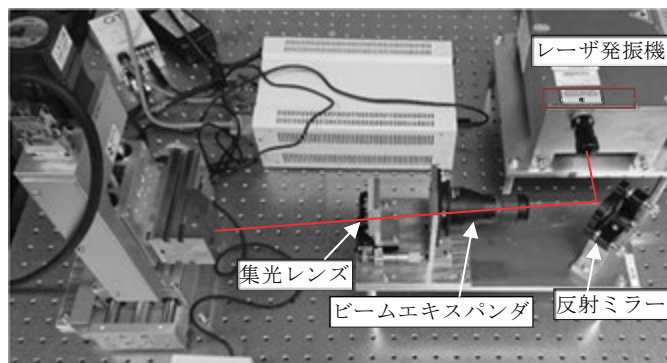


図 2 短パルス UV レーザの光学系

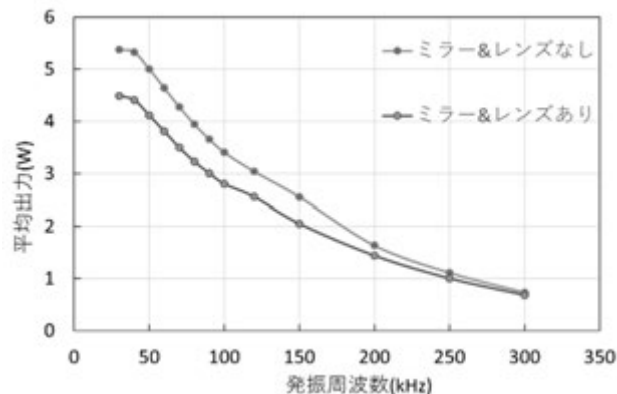
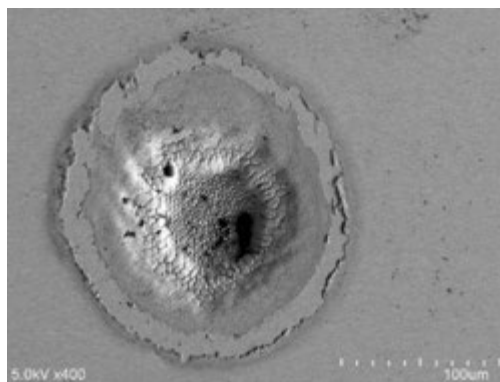


図 3 ミラー&レンズによる出力損失
(レーザ出力と繰り返し周波数の関係)



UV レーザによりバインダレス超硬合金を加工することができる。そこで、レーザ援用に適した加工サイズ（深さおよび加工径）の設定条件を求める。

図5にレーザ光平均出力と穴径の関係を示す。平均出力の上昇に伴い穴径は大きくなり、平均出力0.45Wで直径16 μm だった穴径は4.15Wで直径36 μm まで拡大する。すなわち、発振周波数を制御することによりレーザ加工による援用度合いを制御することができる。一方、穴径は加工時間の影響をほとんど受けない。

また、図6に示すように、穴深さは照射時間とともに深くなり、5s照射16.2 μm だった穴深さは40s照射で159 μm に達する。さらに、穴深さは平均出力の上昇に伴い深くなり、図7に示すように発信周波数80kHz（3.0W）では7.91 μm であった穴深さは40kHz（4.5W）では71.1 μm に達する。すなわち、レーザの発振周波数と照射時間を制御することにより、レーザ援用に適した加工サイズを設定することができる。

2.3 バインダレス超硬合金のUVレーザによる溝加工

図8に平均出力1.0W（発信周波数250kHz）、工作物移動速度0.02mm/sの条件で溝加工を施したバインダレス超硬合金の光学顕微鏡写真（ニコン製、MM-400/U）を示す。図より、UVレーザによりバインダレス超硬合金に溝加工を行うことができる。

図9にレーザ出力と溝幅の関係を示す。平均出力0.45W以下では溝は形成されない。平均出力の上昇に伴い溝幅は大きくなり4.15Wでは37.5 μm の幅になる。溝幅はレーザ周波数や照射時間の影響は殆ど受けないが、平均出力が低くなるほど溝深さは浅く、照射時間

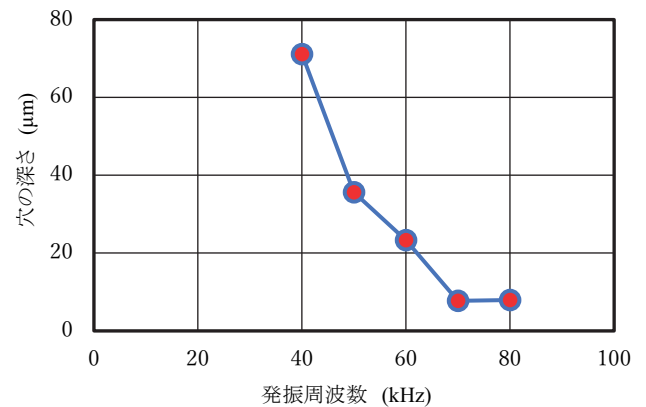


図7 レーザ出力と穴深さの関係

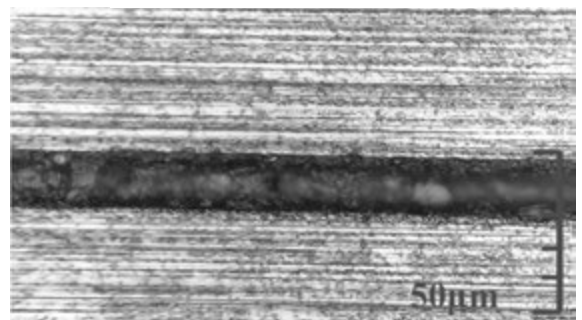


図8 バインダレス超硬合金の溝加工写真
(平均出力1.0W (250kHz), 移動速度0.02mm/s)

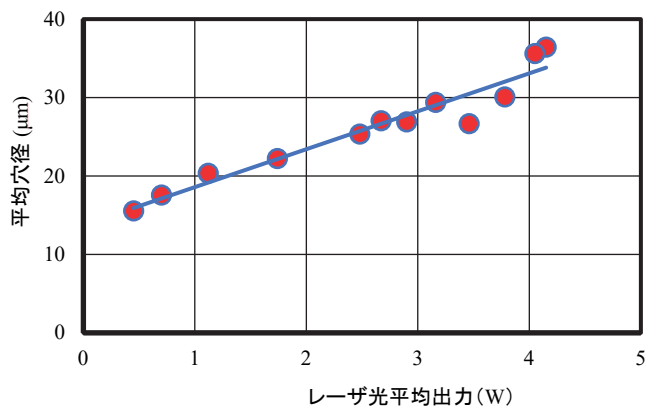


図5 発振周波数と穴径の関係

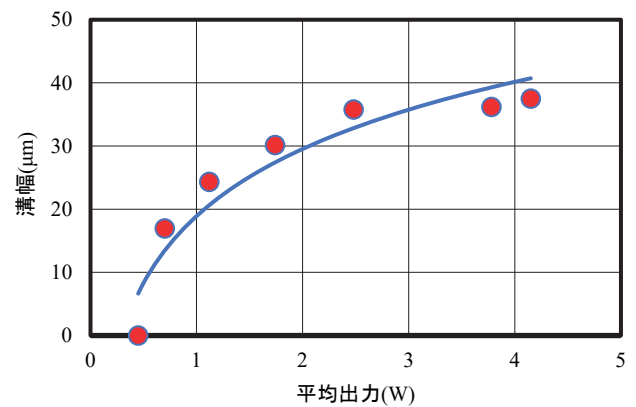


図9 レーザ出力と溝幅の関係
(操作速度0.02mm/s)

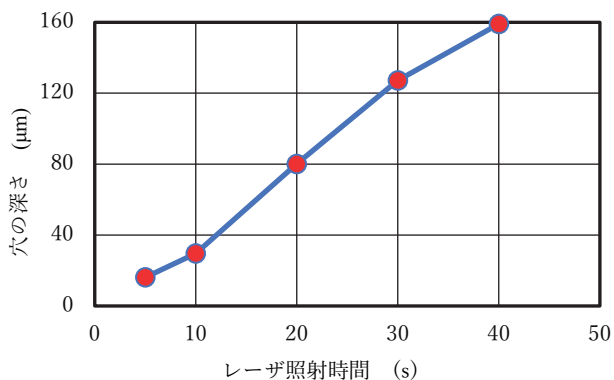


図6 レーザ照射時間と穴の深さの関係

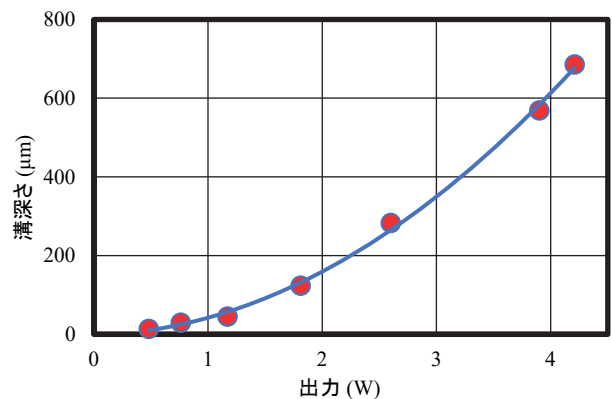


図10 レーザ出力が加工溝深さに及ぼす影響

が長くなるほど溝深さは深くなる。ダイヤモンド工具の工作物との接触面積を $5\mu\text{m}$ と仮定すると、レーザ加工による溝幅が $5\mu\text{m}$ 以下となる 0.6W 程度の出力がレーザ援用の最適値となる。

図 11 にレーザ操作速度が 0.02mm/s に於けるレーザ平均出力と溝深さの関係を示す。レーザ出力の上昇に伴い溝は深くなり、平均出力 0.48W のレーザでは $13.6\mu\text{m}$ の溝幅が形成されるが、平均出力 4.5W のレーザでは $685\mu\text{m}$ の溝幅に達する。

3. ダイヤモンドの光学特性

3.1 ダイヤモンドの光透過特性

短パルス UV レーザによるダイヤモンドの加工を試みる。表 3 に示すように、一般的に工具材料として用いられる Ia タイプダイヤモンド（住友電工製、PD1540KK）と不純物の少ない IIa タイプダイヤモンド（天然ダイヤモンド）を供試ダイヤモンドとして用いる。

ダイヤモンドの光透過特性を図 12 に示す。Ia タイプのダイヤモンドはグリーンレーザ（波長 600nm ）以下の波長領域では、透過率が極端に低下し、 400nm 以下の波長は殆ど透過しない。一方、IIa タイプのダイヤモンドは UV 領域の 300nm 以下までレーザ光の透過率はほとんど低減しない。すなわち、Ia タイプのダイヤモンド工具は波長 355nm の UV レーザ光を透過することができないので援用工具として使用できないが、IIa タイプのダイヤモンド工具では UV レーザ援用工具として使用できる可能性がある。以下で、実証実験によりダイヤモンド工具のレーザ光透過特性を調べる。

3.2 ダイヤモンドの UV レーザ加工実験

Ia タイプのダイヤモンドに超硬合金表面に UV レーザを集光した結果を図 13 に示す。Ia タイプのダイヤモンドは UV レーザ光を透過しないため、ダイヤモンドはレーザ光を吸収して加工される。すなわち、レーザ援用加工用のダイヤモンド工具としては不適當である。

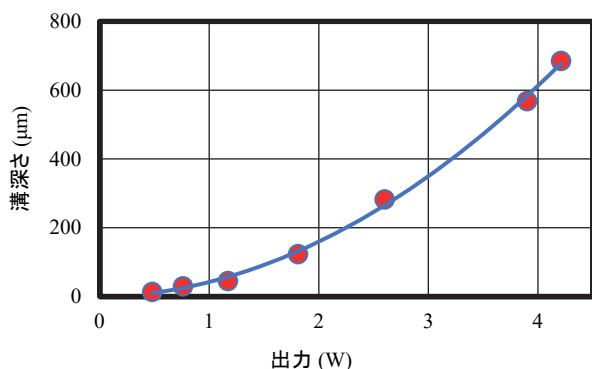


図 11 レーザ出力が加工溝深さに及ぼす影響

表 3 ダイヤモンドの仕様

ダイヤモンド	Iaタイプ
型式・メーカ	PD1540KK (住友電工製)
硬度	Hk10700
ヤング率	1050 [GPa]
線膨張係数	1.5×10^{-6} [1/K]
熱伝導率	2000 [W/(M·K)]
比熱	516 [J/(KG·K)]
融点	4000 [K]

一方、図 14 に示すように、IIa タイプのダイヤモンドは 4.8W の UV レーザを照射しても、照射面に変化は生じない。すなわち、IIa タイプのダイヤモンドはレーザ援用加工における工具として使用できる。

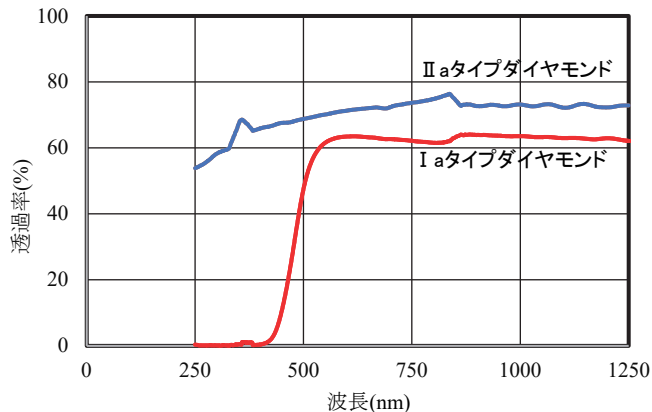


図 12 供試ダイヤモンドの光透過特性



図 13 Ia タイプダイヤモンド UV レーザ照射 (3W, 1.0mm/s)

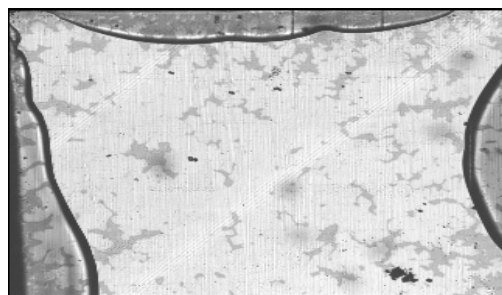


図 14 IIa タイプダイヤモンド UV レーザ照射 (4.8W)

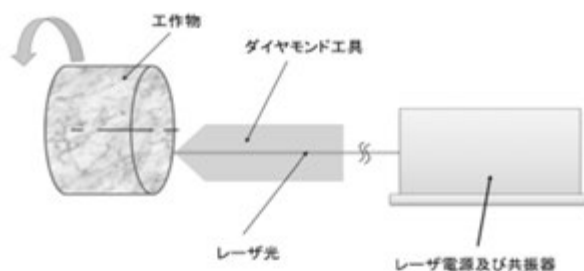


図 15 レーザ援用微細切削装置

4. レーザ援用切削装置

本研究により、硬脆材料のレーザー援用ダイヤモンド切削に関する基礎的研究がほぼ終了したので、引き続き図 15 に示す装置を用いて、バインダレス超硬合金をはじめとする硬脆材料のレーザー援用加工を実施する。

5. 結論

- 1) コバルトレス超硬合金は UV レーザにより加工でき、平均出力および照射時間を変更することにより加工能率を制御することができる。
- 2) Ia タイプのダイヤモンドは UV レーザ光を吸収するが、IIa タイプのダイヤモンドは UV レーザを透過する。
- 3) Ia タイプのダイヤモンド工具内部に UV レーザを透過することにより、レーザー援用切削加工の実現可能性がある。

謝辞

本研究は 2020 年度および 2021 年度工学研究所共同研究の助成研究である。本研究のために研究助成いただいた神奈川大学工学研究所に感謝申し上げます。また、研究分担者として様々なアドバイスをいただいた工学部機械工学科の中尾陽一教授、楠山純平特別助教、防衛大学の北嶋孝之准教授、中部大学の鈴木浩文教授、埼玉大学の池野順一教授、千葉大学の比田井洋史教授に感謝申し上げます。また、レーザー加工面の測定にご協力いただいた株式会社松岡伸夫様、芝田英孝様、ダイヤモンドに関して様々なご協力いただいた城南ダイヤモンド工業株式会社の森泉利之社長に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 社本英二, 森本祥之, 森脇俊道, 楢岡振動切削加工方法 (第 1 報) —加工原理と基本特性—, 精密工学会誌, 62 (8), 1127-1131 (1996).
- [2] 角谷均, 原野佳津子, 佐藤武, バインダレスナノ多結晶ダイヤモンドの実用化開発, 2021 年度精密工学会技術賞, 精密工学会誌, 78 (2), 108-111 (2012).
- [3] 鈴木浩文, 単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具による超硬合金の精密研削, 砥粒加工学会誌, 59(8), 433-436 (2015).
- [4] 由井明紀, 松岡浩司, 田中隆行, 奥山繁樹, 北嶋孝之, 単結晶ダイヤモンド工具による超硬合金の切削加工-第 1 報—ダイヤモンドと超硬合金の摩擦特性, 砥粒加工学会誌, 54(9), 545-550, (2010).
- [5] 由井明紀, 松岡浩司, 奥山繁樹, 北嶋孝之, 岡畑豪, 単結晶ダイヤモンド工具による超硬合金の切削加工-加工雰囲気、切削温度と工具摩耗に及ぼす影響, 砥粒加工学会誌, 54(10), 613-618, (2010).
- [6] 由井明紀, 松岡浩司, 奥山繁樹, 北嶋孝之, 岡畑豪, 単結晶ダイヤモンド工具による超硬合金の切削加工-切削油剤が工具の摩耗・摩擦特性に及ぼす影響, 砥粒加工学会誌, 54(11), 654-659, (2010).
- [7] Peter Krajcinik, Amir Rashid, Franci Pusavec, Maja Remskar and Akinori Yui, Transitioning to sustainable production, Part III developments and possibilities for integration of nanotechnology into material processing technology, Journal of Cleaner Production, (2015).
- [8] 小松崎玲美, 池野順一ら, 2021 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, ナノ秒レーザーを用いた単結晶 SiC のレーザーライシニング加工 (2021).
- [9] 齊藤雅文, 池野順一ら, 2021 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, レーザ照射によって内部で生じる現象について (2021).
- [10] 高塚望史, 池野順一ら, 2021 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, レーザライシニングによるガラスレンズ製造の試み (2021).