

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14137

研究課題名(和文) 光共振援用による次世代光学素子の高能率超精密加工への挑戦

研究課題名(英文) Challenge to highly-efficient ultra-precision machining for next-generation optical element by assisting optical resonance

研究代表者

柿沼 康弘 (Kakinuma, Yasuhiro)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・准教授

研究者番号：70407146

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：従来の光学材料における機械加工をより高精度かつ高能率にすることを目的として、本研究では光共振と近接場光を援用した光学素子の超精密加工法に関する研究を実施した。光学材料表面に発生させた近接場に微小工具を近づけ、光エネルギーを工具先端に集中させることで、アブレーションを生じさせながら切削加工を行う加工方法の開発に成功した。微小径エンドミル加工試験の結果、近接場光援用により光学材料を低切削力で加工できることを実験的に示した。

研究成果の概要(英文)：In order to machine optical materials with higher accuracy and higher efficiency, the research on ultra-precision machining by assisting optical resonance and near-field light has been conducted. A novel micro-machining method performing ablation simultaneously has been successfully developed by assisting near-field light and focusing the light to micro-tool edge. From the result of micro end-milling test, it is clear that near-field light assisted machining makes cutting force lower, compared with general micro-machining.

研究分野：生産加工

キーワード：超精密加工 微小光共振器 レーザ援用加工

### 1. 研究開始当初の背景

理論的にエネルギー消費のない次世代光信号処理回路の光学素子に微小光共振器がある。素子材料として光学特性に優れた単結晶蛍石が最適とされているが、異方性のためエッチングは適用が難しく、超精密加工が唯一の製造プロセスである。しかし、異方性と脆性のためクラックレスの延性モード切削の能率には限界がある。そのため高能率な超精密加工を実現する方法の一つとして、レーザや超音波の援用がある。硬脆材料加工においては、Zhaoらは楕円超音波を援用 (Zhao et al., J. Mat. Proc. Technol (2012)), 杉田らはレーザを援用し (Sugita et al., J. Mat. Proc. Technol (2014)), 加工性能を向上させている。しかしながら、蛍石のような単結晶材料の場合、高出力のレーザ熱により、加工面や非加工部が多結晶化し、光学的・機械的特性が変化する。これまでに研究代表者は、超精密切削加工により製造した微小光共振器 (図1) の共振性能が理論値に比べて低くなることを明らかにした。その原因は多結晶化などのサブサーフェスダメージであることが推察された (Kakinuma et al., CIRP Annals (2015))。故に、結晶材料の加工においては、加工負荷を十分に抑え、高能率に延性モード加工を実現し、かつサブサーフェスダメージを抑制する加工法の開発が必要不可欠である。

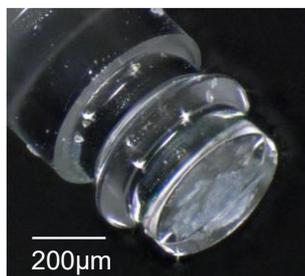


図1 超精密加工により製造した微小光共振器

### 2. 研究の目的

蛍石内に光共振現象を発生させると光熱変換による熱膨張および熱放出時の熱光学効果により、光共振波長が瞬間的かつ周期的に変化する現象を発見した (Tanabe et al., CLEO/Europe - EQRC 2015)。これを加工の視点に転じると、蛍石内部で熱膨張と熱収縮の繰り返しによる格子間振動を付与できることになり、加工時の格子間の切断を容易にすると考えた。そこで本研究では、蛍石の超精密加工を対象として、光共振現象ならびに近接場光を援用した光援用加工法を提案し、加工特性向上の可能性について基礎的研究を実施した。

### 3. 研究の方法

(1) 始めに、蛍石基板内に光共振系を構築することを検討した。本研究においては、蛍石の機械的特性の変化を捉えることに焦点を置

くため、蛍石基板のような平板内に光共振を起こす系を設計する必要がある。そこで、図2に示すようなファブリペロー共振を応用した光共振系を検討した。

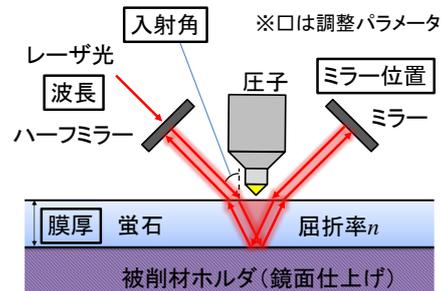


図2 ファブリペロー共振系を応用した加工システムの提案

(2) 次に近接場を援用した光援用加工法を検討した。図3に示すような被削材内部で光を全反射させ、工作物表面に染み出す光エネルギーを微小径工具先端で増強することでアブレーションと機械加工を同時に作用させる方法を提案し、その有効性を検討した。

(3) 両者の加工方法を理論的に比較し、効果の高い手法を選択し、実際の光学系を構築する。構築した光学系を適用して加工試験を行い、光学材料の超精密加工において光援用加工法の有効性を実験的に評価する。

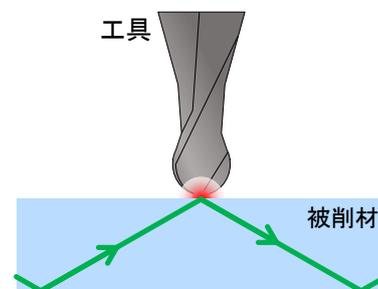


図3 近接場光を応用した光援用加工手法の提案

### 4. 研究成果

#### (1) 援用する光学系の検討

提案したファブリペロー共振を応用した実験系において被削材内での光吸収エネルギーを計算したところ、ミラーでの反射によって、有効吸収率が10%にも満たないため、光共振現象を機械加工の援用手法として有効活用できないことがわかった。一方で、近接場を援用した手法は、微小径工具先端に光エネルギーを増強できる可能性を確認した。そこで、本研究では、近接場光を援用した手法に絞り、光学系の構築を進めることにした。

#### (2) 近接場を援用した光学系の開発

光が異なる媒質の境界面に入射すると、反射や屈折が起こる。屈折率  $n_1$ ,  $n_2$  ( $n_2 < n_1$ ) をも

つ2つの媒質の境界面に光が入射するとき、式1に示すスネルの法則が成立する。

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

また、式2を満たす角度  $\theta_c$  を臨界角と呼ぶ。

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

スネルの法則より、入射角  $\theta_i$  が臨界角  $\theta_c$  に等しいとき屈折角は  $\pi/2$  となり、これより大きい入射角に対して、スネルの法則を満たす屈折角は存在しない。これは、 $\theta_i > \theta_c$  のとき光が境界面ですべて反射されることを意味し、この現象を全反射と呼ぶ。この時、低屈折率側の媒質の界面付近にエバネッセント波という局在波が発生する。図3に示すように、エバネッセント波が発生している点に先端が十分鋭利な金属工具が近づくことで、電界の集中が起き、増強電場が発生すると考えられる。これにより、被削材表面に発生する近接場光のエネルギーを工具の先端で増強させアブレーションを発生させながら光学材料の微細切削加工を行う。

上記に基づき構築した光学システムの概略を図4に示す。本研究で使用するレーザーは、レーザー径 6 mm のナノ秒パルスレーザーで、その仕様を表1に示す。設計したテーブルユニットの構成を図5に示す。2つのアルミ製ジグと、レーザー光の入出力と全反射を行うBK7ガラス製の台形プリズムで構成される。部品1には台形プリズムを固定するために45°の傾斜を施した溝を設けた。部品2は部品1に被せるように固定し、上面にはプリズムを覗く窓が設置されている。被削材を設置するために、部品2と台形プリズムの上面を一致させた。テーブルユニットは、台形プリズムの側面へ垂直にレーザー光を入射し、台形プリズムの上面に設置した工作物(ガラス板)上で3回、プリズムの底面で2回全反射し、逆側の側面から出射するように設計した。さらに、入射側と出射側にそれぞれ直角プリズムを使用することで、このテーブルユニットに45°でレーザーを入射し、水平に出射させる仕組みとした。実際に構築した近接場光援用加工装置を図6に示す。

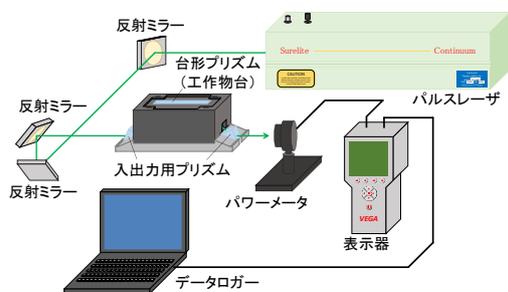


図4 近接場光援用加工のための光学系

表1 レーザの仕様

繰り返し周波数	エネルギー	パルス幅	波長
10 Hz	475 mJ	5-7 ns	1064 nm

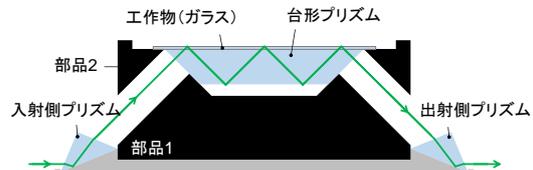


図5 近接場光援用のためのテーブルユニット (工作物台)

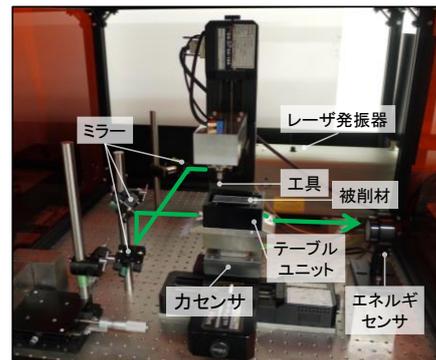


図6 近接場光を援用した加工装置の外観

### (3) 光学系の性能評価

構築した光学システムにおいて、光学経路を確認するために、レーザーパワーの測定を実施した。レーザー出射直後とプリズム透過後におけるレーザーパワーを測定した結果、90%のエネルギーロスが生じているが、光学システムを構築できていることを確認した。

### (4) 非回転工具による近接場光援用加工の性能評価

近接場光援用加工と比較するため、3  $\mu\text{m}$  から 30  $\mu\text{m}$  まで 3  $\mu\text{m}$  ごとに深さを変えて、レーザーを援用しない非回転工具による押し込み実験を実施した。押し込み力と最大加工深さの関係を図7に示す。

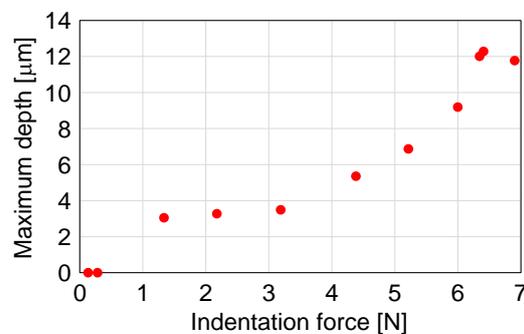


図7 押し込み力と押し込み深さの関係 (近接場光援用なし)

また、押し込み力が  $0.28\text{ N}$  と  $1.34\text{ N}$  のときの加工痕を図 8 に示す。この結果から、押し込み力が低い ( $0.28\text{ N}$  以下) のときには、加工痕が形成されないことを確認した。

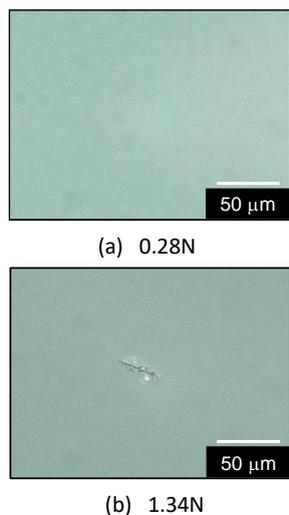


図 8 押し込み試験後の表面（近接場光援用なし）

次に、レーザ援用押し込み試験を実施した。押し込み力とレーザ出力の関係を図 9 に、試験後の加工痕の様子を図 10 に示す。工具を接触させ押し込み痕が生じない  $0.15\text{ N}$  の押し込み力を与えた状態で、レーザを入射して近接場光を援用したところ、入射直後に押し込み力が小さくなることを確認され、最終的に力が  $0$  になった。表面写真から、 $0.2\text{ N}$  以下の小さな押し込み時でもレーザを援用することでアブレーションによる除去加工がなされることを確認した。以上の結果から、近接場光を援用することで、通常よりも小さい切削力で材料の除去加工ができることが推察された。

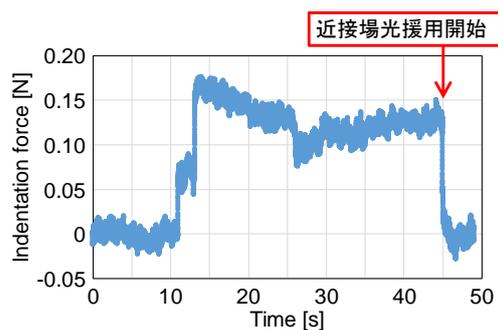


図 9 近接場光援用による押し込み力の変動

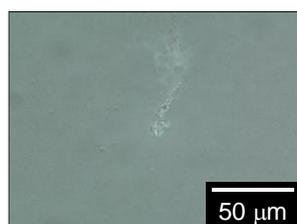


図 10  $0.15\text{ N}$  にて接触させた状態で近接場光を援用した際に生じた押し込み痕

#### (5) 回転工具による近接場光援用加工の性能評価

非回転工具にて提案手法の有効性を確認できたことから、微小径ボールエンドミルを  $5000\text{ min}^{-1}$  で回転させ、加工実験を行った。回転工具を工作物に近づけ、 $1.6\text{ N}$  の切削力になる点の加工量を比較した。図 11 に示す通り、近接場光を援用しない場合、加工深さは  $6.5\text{ }\mu\text{m}$  加工穴径  $75\text{ }\mu\text{m}$  であるのに対し、近接場光を援用することで、加工深さ  $8.0\text{ }\mu\text{m}$ 、加工穴径  $90\text{ }\mu\text{m}$  となった。この結果、提案した近接場光援用加工により、工具負荷を軽減し、加工能率を向上できる可能性が示された。

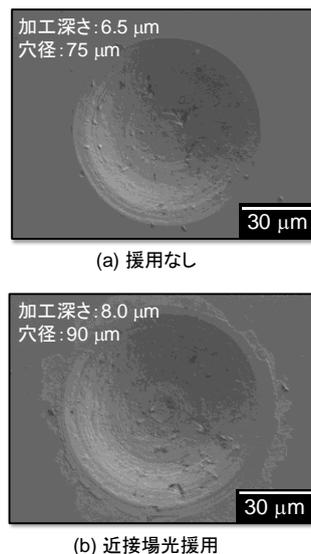


図 11 微小径エンドミルによる加工試験結果（同加工条件で軸方向成分が  $1.6\text{ N}$  に達した際の加工結果）

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 4 件）

- ① Y. Mizumoto, Y. Kakinuma, “Revisit of the Anisotropic Deformation Behavior of Single-crystal  $\text{CaF}_2$  in Orthogonal Cutting” Precision Engineering, In press, 査読有 doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.01.011
- ② Y. Mizumoto, H. Itobe, H. Kangawa, M. Fuchida, T. Tanabe, Y. Kakinuma, “Development of  $\text{CaF}_2$ -brass hybrid WGM microcavity by using ultra-precision machining,” Mechanical Engineering Letters, Vol. 4, 2018, No.17-00491, 査読有 doi.org/10.1299/mel.17-00491
- ③ Y. Mizumoto, P. Maas, Y. Kakinuma, S. Min, “Investigation of the cutting mechanisms and the anisotropic ductility of monocrystalline sapphire” CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 66, No. 1, 2017, pp. 89-92, 査読有 https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.018

- ④ Y. Mizumoto, H. Amano, H. Kangawa, H. Harano, K. Sumiya, Y. Kakinuma, “On the Improvement of Subsurface Quality of CaF<sub>2</sub> Single Crystal Machined by Boron-doped Nano-polycrystalline Diamond Tools” Precision Engineering, Vol. 52, 2017, pp. 73-83, 査読有  
doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.11.005

[学会発表] (計 2 件)

- ① Y. Mizumoto, H. Amano, M. Fuchida, T. Tanabe and Y. Kakinuma, “Influence of tool geometry on Single-crystal CaF<sub>2</sub> in an Ultra-precision machining” Proceedings of the euspen’s 17th International Conference & Exhibition, Hannover, Germany, May 29th to June 2nd (2017)
- ② Y. Mizumoto, H. Kangawa, Y. Nakagawa, H. Itobe, T. Tanabe and Y. Kakinuma, Influence of micro-cracks using optical micro-resonator processing of single-crystal calcium fluoride, manufactured by ultra-precision cylindrical turning, euspen’s 16th International Conference & Exhibition, Nottingham, UK, May 30th to June 3rd (2016)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

柿沼 康弘 (KAKINUMA, Yasuhiro)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：70407146