

令和元年6月10日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18828

研究課題名(和文)計量ドレスト光子プローブによる原子構造体の3次元加工現象解析に関する基礎研究

研究課題名(英文) Fundamental study on Metrology dressed photon probe for analyzing atomic clusters in machining phenomena

研究代表者

高谷 裕浩 (Takaya, Yasuhiro)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：70243178

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、量子もつれ光子対の強い量子的相関を利用することによって、量子もつれ光子対、ドレスト光子およびフォノンの量子効果と相互作用を機序とする計量ドレスト光子プローブの基本原理の確立を目的とする。そのため、プローブ性能を左右する最も重要な構成要素である、非線形結晶BiBOを用いたtype-1位相整合SPDCによる偏光量子もつれ光源を設計・試作した。さらに、単一光子検出器と同時計数器などから構成される測定系を構築して同時計数計測を行い、CHSHパラメータ、充実度の2つの指標によって量子力学的相関を評価し、偏光量子もつれ光源から偏光量子もつれ状態が生成されていることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子構造体(工具)と原子構造体(被加工物)の力学的相互作用による加工機序を解明する研究は、これまで分子動力学シミュレーションが用いられてきた。しかし、SEM内切削実験以外の実験的な検証方法は未だ確立されていないのが現状である。本研究成果である計量ドレスト光子プローブ計測によって加工機構が解明され、原子構造体スケールの局所的なフォノン制御を実時間で行うことが可能となれば、機械加工プロセスを原子スケールで局所化できるナノ機械加工・計測融合工学の手法に基づく新しい機械加工原理を創成し、従来技術の限界のブレークスルーが期待される。

研究成果の概要(英文)：The novel entangled photon probe is proposed using two photon interference by entangled photon pairs to establish the quantum optical metrology. Recently, atomic scale analysis of machining process phenomenon is required to improve material removal controllability with nanometer resolution. Therefore, the quantum optical phenomena, such as typical entanglement, are introduced to enhance the resolution of the optical measurement technique drastically. The interest in entanglement has been stimulated by the possibility that entangled photon pairs might beat the diffraction limit. We have proposed a light source for the generation of the polarization-entangled photon pairs (PEPP) by using a nonlinear crystal BiBO. For development of the light source, the geometrical parameters of the crystal are designed. The constructed light source is confirmed to generate entangled photons pairs by measuring the PEPP using a time-correlated coincidence system.

研究分野：機械工学・生産工学・加工計測

キーワード：フォトン・プローブ 量子もつれ ドレスト光子 原子構造体 ナノ微細加工 ナノ機械加工 加工現象解析 フォトンメトロロジー

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

ナノ機械加工技術は、予測されうるあらゆる系統誤差を徹底的に排除、低減することによりナノメートルの加工精度を達成した。その適応領域はマイクロ・ナノテクノロジーへと展開し、サブナノメートルに迫る微細化、高精度化とともに新材料への適用性が要求されている。しかし、現状のナノ機械加工技術の限界を超えるためには、これまで予測不可能とされてきた加工精度を低下させる支配的要因を原子スケールで同定・制御する必要があり、その解決が大きな課題となっている。さらに、ナノ組織制御金属や電子・光学結晶材料などの新素材の材料除去プロセスを高精度に制御するためには、原子構造体スケールの加工現象理解が不可欠であり、特に動的な計測・解析技術はほとんど未着手である。

2. 研究の目的

これまで研究代表者らは、ナノ物質（フラーレンやナノダイヤモンド¹⁾）による機械的および化学的作用を利用したナノ平滑化加工原理、および超短パルスレーザーの微細ビーム形成²⁾やコヒーレントフォノン励起を積極的に利用したナノ微細加工原理の創生に関する研究を遂行し、優れた加工特性を実証している。さらに、それらの加工機構を独自の表面増強ラマン散乱³⁾やフォノン⁴⁾の計測・分析に基づいて解明している。一方、新奇な計測原理の開拓においては、光放射圧で捕捉したマイクロガラス球を利用した位置検出プローブ⁶⁾を開発し、マイクロ3次元加工形状をナノメートルの分解能で測定可能にした。さらに、光子の量子効果である光スピンホール効果を利用したサブ nm オーダー分解能の変位計測プローブ⁷⁾⁸⁾の基本原理を検証している。これらの研究によって培われたナノ・マイクロ加工、光応用ナノ計測、量子光工学に関する高度な解析・実験技術を駆使したナノ加工原理の加工機構の解明を進め、次のような知見を得ている。

- (a) 原子構造体スケールの加工現象を測定するためには、光子のもつ原子レベルの応答特性を利用するラマン散乱などの測定原理が有効である。
- (b) しかしながら、上記の計測手法で検出する光子は、物質情報は持っているが空間情報は持っていない。そのため空間情報は伝搬光の性質を利用している。従って回折限界を越える飛躍的向上は困難である。
- (c) (光スピンホール効果の場合) 光子の量子効果による計測手法は伝搬光の限界を超えることができる。

よって、物質情報だけでなく、空間情報の測定にも光子の量子効果が有効であり、量子もつれ光子対による2光子量子干渉を用いる新しい原理の導入が必要である。一方、切削、研削、研磨などのマクロな機械加工原理は、工具-被加工物の高速な（固体-固体間）接触による力学的な材料除去機構に基づいている。ナノ機械加工における加工機序を解明するためには、そのような加工現象を数 10nm のナノ領域に局所化し、原子構造体（工具）と原子構造体（被加工物）の力学的相互作用によって生ずる温度場や応力場の原子スケールの過程を計測・解析する必要がある。

そこで本研究は、原子構造体スケールの加工現象によるフォノンの運動（あるいはフォノン散乱）を加工表面原子層の3次元空間において計測可能とし、量子もつれ光子対、ドレスト光子およびフォノンの量子効果と相互作用を機序とする新たな計量ドレスト光子プローブの基本原理の確立をめざし、次の研究課題(1)、(2)の達成を目的としている。

- (1) 変調ドレスト光子の計測原理およびフォノンの状態推定に関する基本原理の確立。
- (2) 量子もつれ光子対の2光子量子干渉に基づいた空間計量に関する基本原理の確立。

3. 研究の方法

加工点のナノ領域では、局所的な高温度域の変動や静的および動的な応力場の生成・消滅の繰返し⁹⁾によって原子空孔やナノ欠陥が動的に生成される。これらの欠陥によって分断される原子集団は動的に変化する仮想量子ドットとみなすことができる。入射光子 (ω_i) が結合すると、仮想量子ドット表面には物質と独立な光子ではなく、物質の状態と光子の状態が混合した状態、すなわちドレスト状態となった準粒子（ドレスト光子）が生成する。さらに、加工現象によって運動する音響フォノンや光学フォノンはドレスト光子 (ω_D) と相互作用し、それぞれ変調されたドレスト光子として散乱され、ブリルアン散乱光やラマン散乱光として計測される。従って、散乱されたドレスト光子を計測することにより、加工現象を反映したフォノンの状態を推定することができる。さらに、一連の量子過程が生起している空間領域を原子スケールで“計量”するため、量子もつれ状態にあるシグナル光子とアイドラ光子の量子力学的な性質（量子テレポーテーション）を利用する。すなわち、アイドラ光子を入射光子 (ω_i)、シグナル光子を参照光子 (ω_s) とした2光子量子干渉の原理を適用することによって、入射光子 (ω_i) を起源として散乱されたドレスト光子が存在する空間領域を同定する。

量子もつれの関係にあるシグナル光子 ω_s とアイドラ光子 ω_i は図1のような挙動を示す. 図1 (a)のような光路長 Z_1 , Z_2 が調整できる光路において, $Z_1=Z_2$ のときは図1 (b), $Z_1 \neq Z_2$ のときは図1 (c)の光路を通る. すなわち, 量子テレポーテーション現象によって図1 (d)の同時計数確率が鋭い負のピーク信号で0を検出し $Z_1=Z_2$ であることを知らせてくれる. この原理に基づいて, 物質情報と空間情報の両方を持つ光子による斬新な計量ドレスト光子プローブの計測原理を提案する.

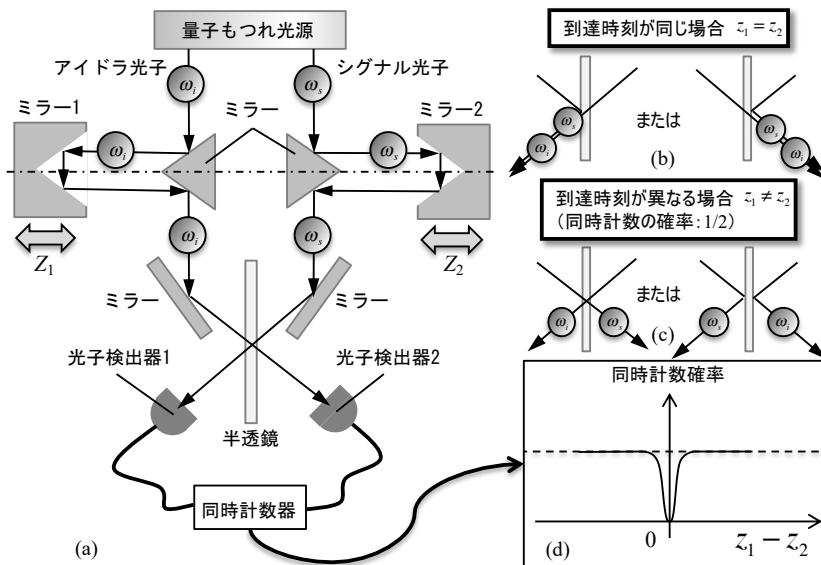


図1 量子もつれ光子対の相関特性

以上のような量子もつれ光子対, ドレスト光子およびフォノンの相互作用を利用する計量ドレスト光子プローブシステムの基本構想を図2に示す. 測定系はプローブ計測系と変位計測系から構成される. 量子もつれ光源から発振されるシグナル光子とアイドラ光子は波長フィルタで分離され, 光ファイバを通してそれぞれの計測系へ導く. 本研究では, プローブ性能を左右する最も重要な構成要素である量子もつれ光源の設計・試作に注力し, 基礎的検討と実験的評価を遂行した.

(1) 偏光量子もつれ光源の仕様検討および基本設計

偏光量子もつれ光子対を測定プローブとした計測原理の研究を行うには, 偏光量子もつれ光子対を安定的に発生可能な偏光量子もつれ光源が必須となる. そこで, 偏光量子もつれ光子対は非線形結晶を用いた type-I 位相整合による縮退 SPDC (Spontaneous Parametric Down Conversion) を利用した発生方法について検討した. さらに, 偏光量子もつれ状態の定量的な評価方法として, CHSH パラメータ, 充実度の有効性を数値解析によって示した. 量子もつれ光源の基本設計を行い, 有効非線形定数が 3.72pm/V と他の結晶よりも高く, かつ潮解性がないという点から, 偏光量子もつれ光源に用いる非線形結晶を BiBO (ビスマストリボーレート, BiB_3O_6) に決定した. type-I 位相整合による縮退 SPDC の発生に必要な非線形結晶への入射光には, 波長 402.7 nm の半導体レーザを用いた. 光子のエネルギーと運動量保存に基づき, 波長 402.7 nm 光子から波長 805.4 nm のパラメトリック下方変換¹⁰⁾によって, 偏光量子もつれ光子対が生成される設計仕様とした.

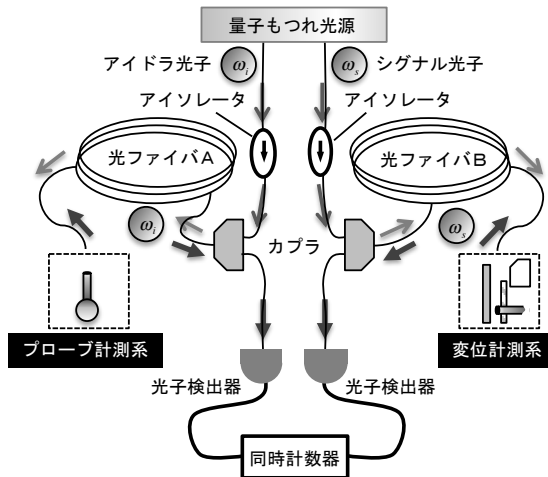


図2 計量ドレスト光子プローブシステムの基本構想

(2) 偏光量子もつれ光源の動作検証および基本特性解析

設計した非線形結晶を用いて, 偏光量子もつれ光源の試作を行った. また, 波長計測によって偏光量子もつれ光源の動作検証を遂行した. さらに, 偏光量子もつれ状態を, 同時計数計測により定性的・定量的に評価するため, 偏光子の角度に対応した2つの光子の直線偏光方位の組み合わせにおける同時計数を測定した. 光子の同時計数計測では2つの入力光子をそれぞれ2つの異なる検出器で検出する. 光子が検出された時, 検出器は電気的なパルス信号を出力する. そのパルス信号を同一の回路に接続し, 回路に入力される時間差を測定することで,

2つの光子がそれぞれの検出器で検出された時間差が測定できる。すなわち、2つの光子が同時に検出される数、すなわち同時計数が測定可能である。

4. 研究成果

(1) 偏光量子もつれ光源の構築と動作実証

量子もつれ光子対とは、離れていても相互作用が生じる状態にある2光子のことである。そのうち、偏光状態によりこの状態が生じている2光子を偏光量子もつれ光子対と呼ぶ。図3に2枚の非線形結晶 BiBO を用いた偏光量子もつれ光子対の発生原理に基づいて設計・試作した偏光量子もつれ光源の構成を示す。偏光量子もつれ光子対は2つの非線形結晶による type-I 位相整合 SPDC によって発生する。非線形結晶に入射した光子が、入射光子の偏光と直交する偏光状態を持つ2つの光子(光子対)に変換される非線形光学現象を利用するものであり、光子のエネルギーと運動量は変換前後で保存されるため、変換後の2光子の波長と波数ベクトルは入力光子から変化する。この現象は、入力光子の偏光方向と非線形結晶の光軸が特定の角度を持つとき発生する。よって、水平偏光の光子を入力すると鉛直偏光光子対が生じる非線形結晶を2つ、光軸を直交させて配置する。45°偏光光子を入力すると、2つの非線形結晶において等確率で type-I 位相整合 SPDC が発生する。

試作した偏光量子もつれ光源の入力光と出力光のスペクトルを分光器で測定し、それぞれのスペクトルにおけるピーク波長を比較する事で偏光量子もつれ光子対発生動作検証を行った。図4にスペクトル分布測定結果を示す。ただし、スペクトル分布はそれぞれのピークパワーで規格化されている。測定されたスペクトル分布から入力光のピーク波長は402.7 nm、出力光のピーク波長は805.4 nm であることが確認された。入力光のピーク波長の2倍と出力光のピーク波長は一致している。従って、type-I 位相整合 SPDC による波長変換作用が確認され、試作した光源によって偏光量子もつれ光子対が発生している可能性が示された。

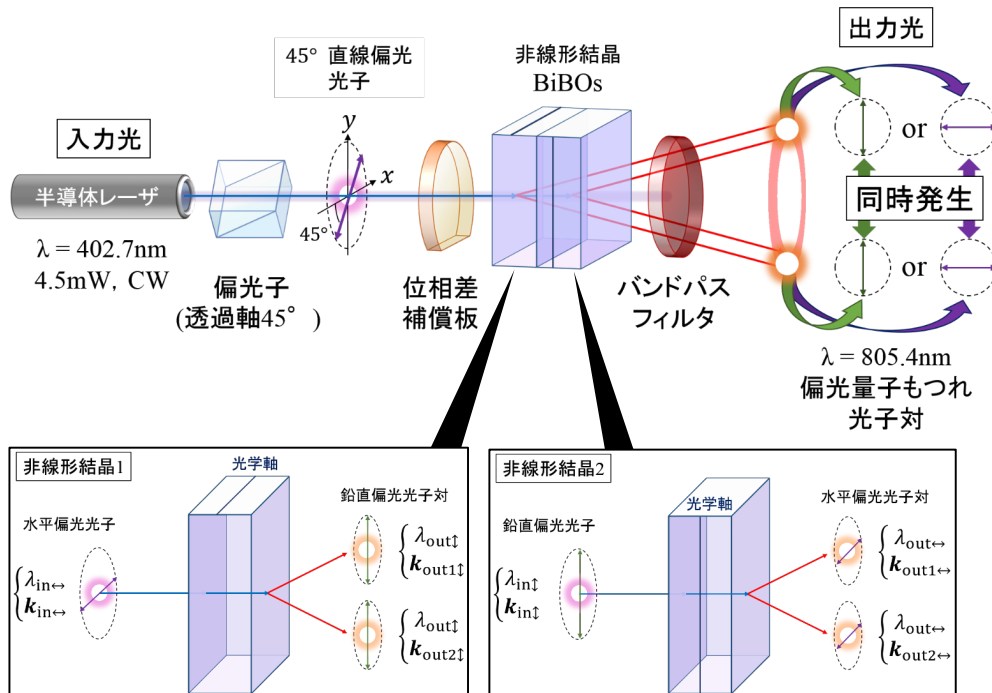


図3 偏光量子もつれ光源の設計・試作

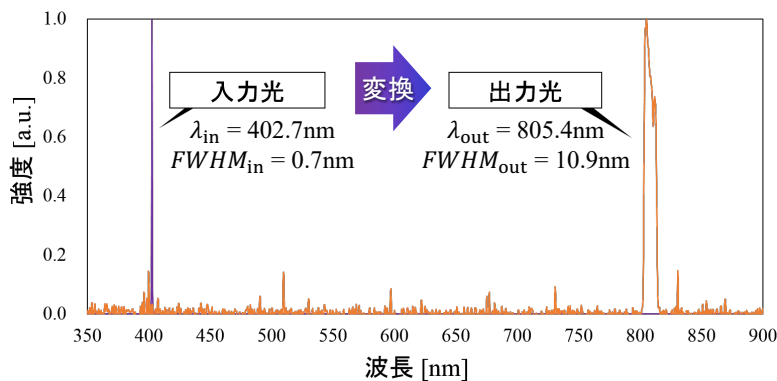


図4 波長測定による偏光量子もつれ光源の評価

(2) 同時計数計測による偏光量子もつれ光源の評価

量子もつれ光子対は次の2つの性質を持つ。

(性質1) 光子を同時に検出する時これらの光子は偏光において完全に相関している。

(性質2) 片方を独立に検出すると相関が消失する。

従って、偏光量子もつれ光子対の検証を行うため、図5に示す単一光子検出器と同時計数器などから構成される測定系を構築し、同時計数計測を行った。CHSHパラメータと充実度を評価するためには、偏光子1の角度が4通り、偏光子2の角度が4通りの計16通りの直線偏光方位の組み合わせにおける同時計数が必要となる。そこで、図6に示す直線偏光方位の組み合わせによる同時計数を測定した。密度行列の測定結果を図7に示す。図8(a)と(b)の比較から、試作した偏光量子もつれ光源で予想される偏光量子もつれ状態に非常に近い状態が生成されていると評価された。さらに、CHSHパラメータおよび充実度の評価値が、それぞれ2.71、0.594と得られたことから、偏光量子もつれ状態が生成されていると定量的に結論付けられる。

本研究によって、偏光量子もつれ光子対を測定プローブとした計測原理の実現性を示しており、本研究の大きな成果として、“空間情報(量子もつれ光子対)と物質情報(ドレスト光子)を持った光子”を量子プローブとして利用する新たな測定技術への展開によって、広範な学術分野における原子スケール現象解析手法への大きな波及効果が期待される。

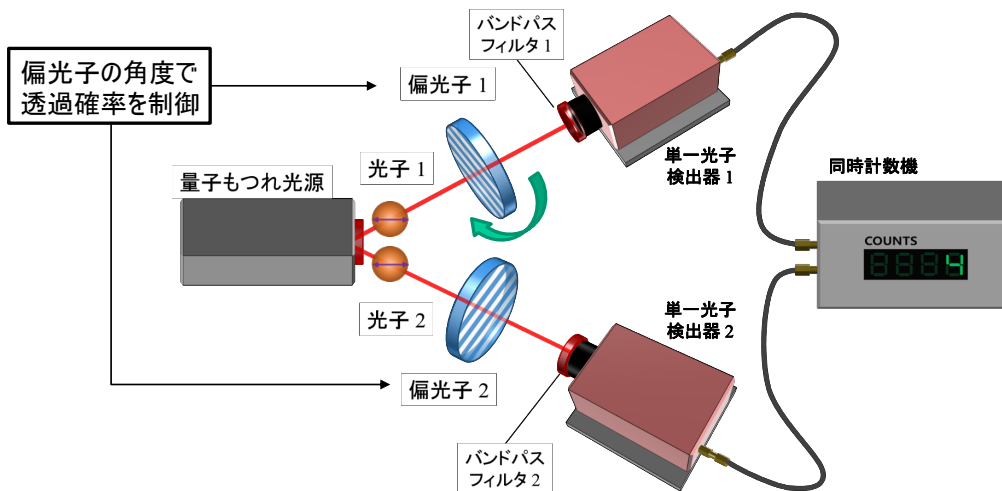


図5 同時計数計測の原理

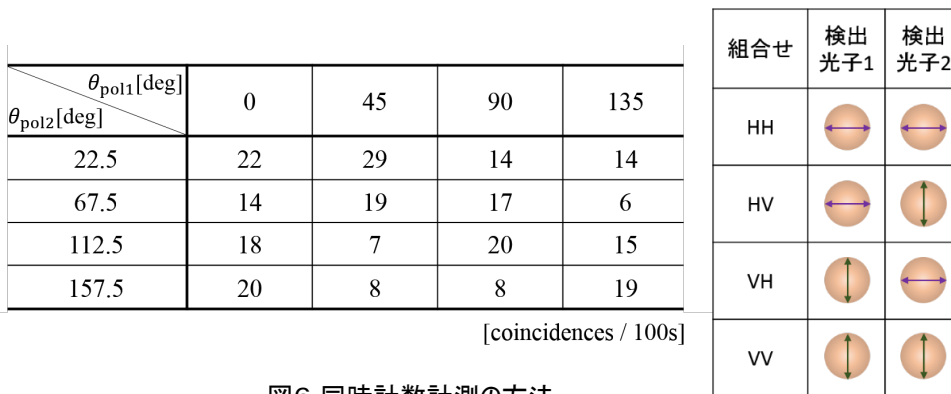
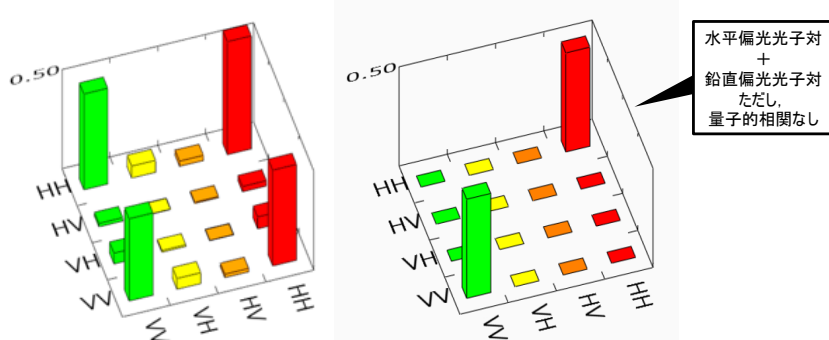


図6 同時計数計測の方法



(a) 測定結果の評価行列 (b) 非もつれ状態における評価行列の理論値

図7 同時計数計測による偏光量子もつれ光源の評価

【引用文献】

- ① 村井亮太ほか, ポリグリセロール修飾ナノダイヤモンドを用いた銅膜の平坦化加工に関する研究, 砥粒加工学会誌, Vol.58, No.2, 2014.
- ② 上野原 努ほか, フォトニックナノジェットを利用した微細加工に関する研究 (第2報) —ビームの位置制御による加工特性の解明—, 2016年度精密工学会学術講演会春季大会講演論文集, 2016.
- ③ Yasuhiro Takaya etc, Surface analysis of the chemical polishing process using a fullereneol slurry by Raman spectroscopy under surface plasmon excitation, *The62th CIRP general assembly*, Copenhagen, Denmark, Annals of the CIRP, Vol.62, Issue 1, 2013.
- ④ Masafumi ASAHI etc, Analysis of chemical reaction in Cu-CMP with reactive nanoparticles based on Raman spectra enhanced by surface plasmon, *Proc. of Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21)*, 2015.
- ⑤ 林 照剛ほか, パルスレーザーを用いたコヒーレントフォノン励起加工に関する研究 (第1報)—コヒーレントフォノン励起加工システムの構築と加工基礎実験—, 精密工学会誌, Vol.80, No.10, 2014.
- ⑥ Yasuhiro Takaya etc, Dimensional measurement of microform with high aspect ratio using an optically controlled particle with standing wave scale sensing, *The61th CIRP general assembly*, Hongkong, China, Annals of the CIRP, Vol.61, Issue 1, 2012.
- ⑦ 水谷康弘ほか, サブ nm オーダ分解能を有するスピンホール効果プローブの開発—(第1報)光スピンホール効果の諸特性—, 2016年度精密工学会学術講演会春季大会講演論文集, 2016.
- ⑧ Yasuhiro Mizutani etc, Spin Hall effect of light applied in optical linear scale, *Proc. of Photonics ASIA 2016*, 2016 (in press).
- ⑨ 尾方英之ほか, 繰り込み群分子動力学によるシリコン単結晶切削時の欠陥生成プロセス解析, 精密工学会誌, Vol.63, No.19, 1998.
- ⑩ 竹内繁樹ほか, 分極反転光デバイスによる新しい光量子科学, *OPTRONICS*, NO.11, 2012.

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計3件)

- ① 矢野史剛, 高谷裕浩, 水谷 康弘, 量子もつれ光子プローブに関する研究 - 量子もつれ光源の評価 - 日本機械学会関西学生会 2017年度学生員卒業研究発表講演会, 2018年3月10日, 摂南大学 (大阪府・寝屋川市)
- ② Yasuhiro Takaya and Yasuhiro Mizutani, Fundamental Study on Photon Metrology, - Role of photon as information media for measurement -, CIRP 2018 Winter Meeting, 2018年2月21-23日, (Paris, France)
- ③ Fumitake Yano, Yasuhiro Mizutani, Yasuhiro Takaya, Fundamental study on entangled photon probe for quantum optical metrology - Development of the entangled photon source -, The Japan Society for Precision Engineering 17th International Conference on Precision Engineering (ICPE2018), 2018年11月12-16日, (Kamakura, Japan)

[その他]

ホームページ等

<http://www-optim.mech.eng.osaka-u.ac.jp/research/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：水谷 康弘

ローマ字氏名：Mizutani, Yasuhiro

所属研究機関名：大阪大学

部局名：大学院工学研究科

職名：准教授

研究者番号 (8桁)：40374152

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。