

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 26 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420043

研究課題名(和文)ピコ秒レーザーによる単結晶ダイヤモンド工具刃先成形とテクスチャリングによる長寿命化

研究課題名(英文)Life elongation by texturing and edge formation of monocrystalline diamond tool using ps pulse laser

研究代表者

山本 武幸 (Yamamoto, Takeyuki)

茨城大学・工学部・技術職員

研究者番号：40396594

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：単結晶ダイヤモンド工具の加工は職人による研磨に頼っている。本研究では、ピコ秒レーザーによる単結晶ダイヤモンド工具先端の成形とテクスチャリングの実現を試みた。さらに、すくい面へのテクスチャの付与が切削性能に及ぼす影響を検討した。実験により、レーザー照射条件が加工溝寸法に及ぼす影響を明らかにした上で、単結晶ダイヤモンド工具先端の成形を試みた。その結果、研磨では難しい複雑な形状でもピコ秒レーザーにより、数ミクロンの精度で成形可能なことを明らかにした。さらに、アルミニウムの実切削により、すくい面にテクスチャを付与した単結晶ダイヤモンド工具は、工作物材料の凝着の低減に有利なことも明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Monocrystalline diamond tools are finished by experts of their grinding or polishing. In this study, forming and texturing of monocrystalline diamond tools were performed by using picosecond laser. Influence of the texturing on the rake face of monocrystalline diamond tool was also examined. After conducting a series of experiments and clarifying the influence of the laser irradiation parameters on the generated single groove's dimensions, forming of tool tip was conducted. As a result, it is clarified that even the shape which is difficult to grind can be formed by using the picosecond laser with a few micro meter precision. Through an actual cutting experiment of aluminum, it is also confirmed that the texturing on the rake face of the monocrystalline diamond tool is beneficial to reduce the adhesion of the workpiece material.

研究分野：生産加工

キーワード：ナノマイクロ加工 レーザ加工 ダイヤモンド工具 テクスチャ 切削

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 単結晶ダイヤモンド工具の特徴と要望

単結晶ダイヤモンド工具は、レンズ用非鉄金属金型や、プリンタなどで大量に利用されているポリゴンミラーをはじめとするアルミ合金製の光学部品、その他の高い形状・寸法精度を必要とする機械部品の切削に広く用いられている。これは、単結晶ダイヤモンドが最高硬度の材料であり、その形状や精度の安定性、耐摩耗性、低摩擦性に秀でているためである。しかしながら、その優れた特性ゆえ、単結晶ダイヤモンドの表面加工は困難とされており、今日でも職人の手によるダイヤモンド砥粒を用いた研磨（研削）に頼らざるを得ない。研究室レベルでは、高温で鉄と反応させる加工や収束イオンビーム、エキシマレーザーによる加工が行なわれているものの、コスト等の面から商用に足りるものではない。また、職人であっても、単結晶における異方性から、いったん(111)面が加工対象面として現れると加工が進まなくなってしまう問題は払拭できない。このような背景から、異方性を考慮する必要がなく、また技能を要せずに単結晶ダイヤモンド工具を成形する手法が求められている。

### (2) 表面テクスチャへの期待

一方、各種表面にテクスチャとよばれる微小な凹凸を設けることにより、表面機能を向上させる試みがなされており、それには摩擦・摩耗特性改善の試みも含まれる。切削工具についても、超硬工具に対しテクスチャ付き工具が研究され、切りくず排出特性の改善が報告されている。しかしながら、テクスチャを単結晶ダイヤモンド工具に適用した例は見当たらない。そのような中、本研究グループによるここ数年の検討の結果、ピコ秒パルスレーザーにより、単結晶ダイヤモンドに対する微細溝加工が実施可能なことが確認された。

## 2. 研究の目的

本研究では、職人による研磨（研削）によって製作されている単結晶ダイヤモンドバイトの先端形状創成に対するピコ秒パルスレーザーによるアブレーション加工の実用性を明らかにする。そこでは、ピコ秒レーザーによってどの程度微細なダイヤモンド先端形状の制御が可能か明らかにする。さらに、潤滑性向上のために超硬工具などで試みられている、工具表面へのテクスチャリングを、超短パルスレーザーにより単結晶ダイヤモンド工具表面にも導入し、前例のないダイヤモンド切削工具表面におけるマイクロテクスチャの効果を明らかにする。

## 3. 研究の方法

### (1) ピコ秒レーザーによる単結晶ダイヤモンドの溝創成データベースの取得

図1に示す、所有のピコ秒レーザー加工システムを溝創成に用いる。エネルギーおよび走査速度、走査回数および焦点深さ方向への送りといった加工条件を変化させながら検討し、それらの条件が加工レートおよび溝の形状と寸法および精度に及ぼす影響を明らかにし、データベースを作成する。測定はおもにレーザー顕微鏡を使用する。

### (2) 単結晶ダイヤモンド工具先端の成形

(1)で得た情報を参考にしつつ、加工レートや精度からみて好適な条件をピックアップし、実際に深さ方向や送り方向に送りを与えながら幾度も走査することにより、単結晶ダイヤモンドバイト先端の形状創成を試み、どの程度の形状創成が可能か検討する。

### (3) 工具すくい面へのテクスチャ創成

工具すくい面を想定した単結晶ダイヤモンド小片の平坦部に対し、深さおよび送り方向への送りを複数回与えることにより、深さ数  $\mu\text{m}$ 、溝幅数十  $\mu\text{m}$  の矩形断面型凹構造をいくつか組み合わせた各種テクスチャを創成する（溝周期は溝幅と同程度）。

### (4) 成形工具の加工形状の評価

(2)において成形した単結晶ダイヤモンド工具により、銅単結晶を切削して工具形状の転写性を評価する。ここでは、低速の微小引っかけ実験を利用する。

### (5) テクスチャを付与したすくい面を持つ単結晶ダイヤモンド工具の切削性能評価

(3)で得た情報を参考にしつつ、図2に示す加工装置上において、図3に示すようなテクスチャ構造を実際に単結晶ダイヤモンド工具のすくい面にテクスチャを加工する。そして、その工具により純アルミニウムを乾式切削し、工具へのアルミニウムの凝着状況などを評価する。

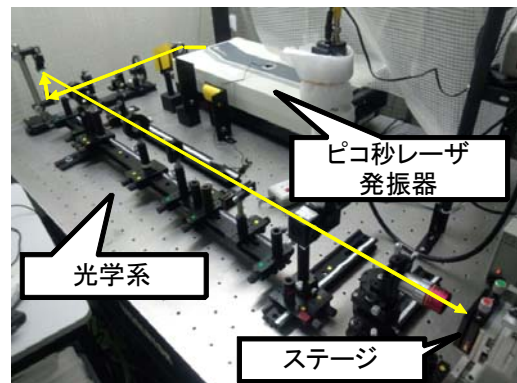


図1 ピコ秒レーザー加工装置の外観

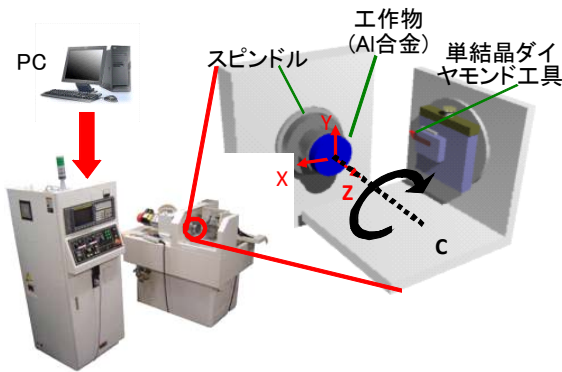


図2 3軸制御型精密加工装置

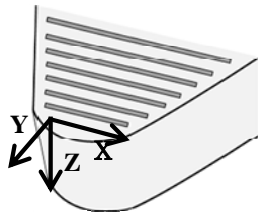


図3 すくい面へのテクスチャ創成の模式図

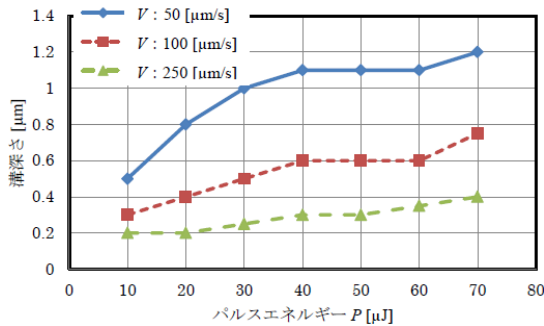


図4 単線溝の加工深さに及ぼすパルスエネルギーと走査速度の影響

#### 4. 研究成果

##### (1) 溝創成データベースの取得

パルス幅 60 ps, 周波数 1 kHz, 波長 1064 nm の Nd:YAG レーザを使用して溝加工を行う。以降、レーザのスポット径を 6 μm とし検討した一連の結果について述べる。

単線溝加工において、溝深さに及ぼすパルスエネルギーと走査速度の影響を調べた結果を図4に示す。図4より、エネルギーの増加および走査速度の減少に伴う溝深さの増大傾向がわかる。

図5は単線溝加工深さに及ぼすレーザ走査回数の影響を調べた結果である。焦点距離は不変であることから、エネルギーごとに飽和深さに至る走査回数が把握できる。

図6は、パルスエネルギー70 μm, 走査速度 100 μm/s で走査回数を変化させて単線溝加工を実施した場合における加工溝の観察結果である。停留時間の影響から、端部の溝幅は深くなっているものの、全般的に安定した溝の生成が把握できる。

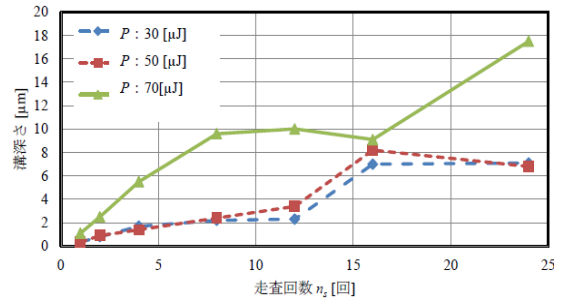


図5 単線溝深さに及ぼす走査回数の影響

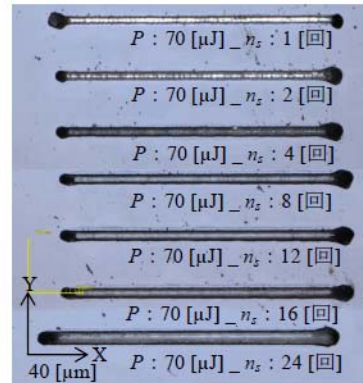


図6 走査回数と溝の形態の観察結果例

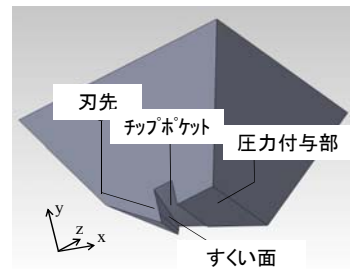


図7 ダイヤモンド工具の加工目標形状

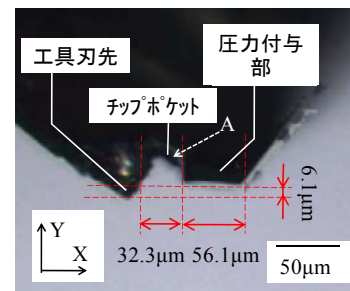


図8 ダイヤモンド工具のレーザ加工結果

##### (2) 単結晶ダイヤモンド工具先端の成形

工具先端の成形の一例として、局所的に静水圧を付与しながら切削をする場合の工具の製造を試みた。図7は目標形状である。

(1)の検討を参考にしつつ、ただし、エネルギーを抑え目にし、パルスエネルギー30 μm, x方向への走査速度 100 μm/s, かつz方向への送りを 5 μm とし、成形を試みた。その結果を図8に示す。

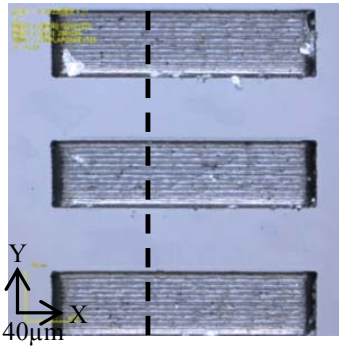


図9 テクスチャの創成例

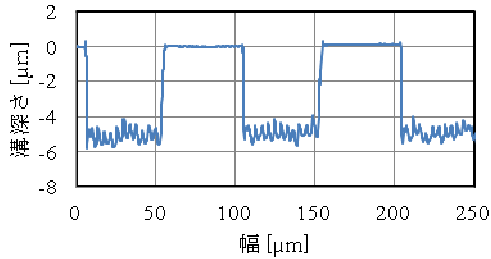


図10 図9のテクスチャの断面形状

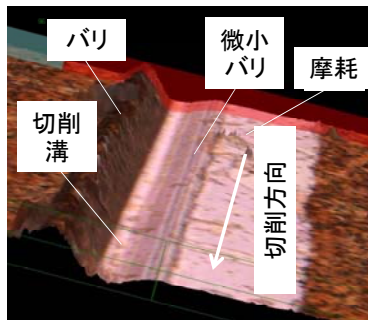


図11 図8の工具による銅の切削表面

図8より、職人による研磨では到底不可能な複雑な形状であっても、数  $\mu\text{m}$  程度の寸法誤差は残るものの、形状創成が十分可能であることがわかる。

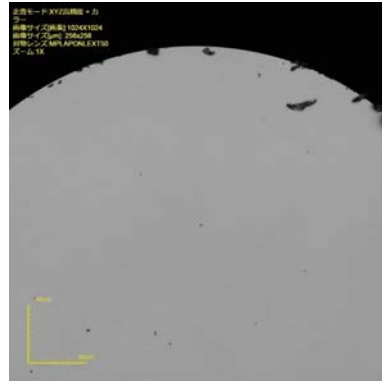
### (3) 工具すくい面へのテクスチャ創成

すくい面に見立てた単結晶ダイヤモンド小片へのテクスチャ創成結果の例を図9および図10にそれぞれ示す。(1)の検討を参考にしつつ、ただし、エネルギーを抑え目にし、パルスエネルギー $30 \mu\text{m}$ 、x方向への走査速度 $100 \mu\text{m/s}$ 、かつ16回走査を繰り返す、y方向への送りピッチを $4 \mu\text{m}$ とした。矩形凹部深さ $5 \mu\text{m}$ 、幅 $50 \mu\text{m}$ 、矩形凹部間隔 $50 \mu\text{m}$ を目標とした。

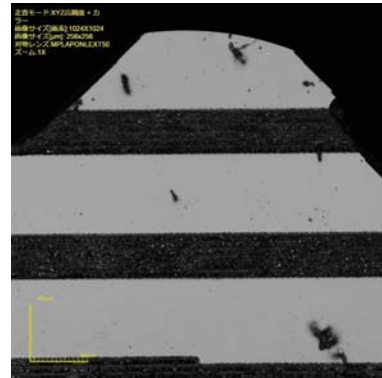
図9および10より、目標のテクスチャが創成できている様子がよくわかる。矩形凹部の底部の粗さは $1 \mu\text{m}$ 程度であるが、送りを工夫すればさらに減少が期待できる。

### (4) 成形工具の加工形状の評価

図8に示した工具による切削を工作物の銅に対して試みた結果を図11に示す。ここで、平坦な圧力付与部により工作物表面が押し



(a) 慣用工具



(b) テクスチャ工具(観察時の事故で破損)

図12 単結晶ダイヤモンド工具すくい面

えつけられる様子や、工具刃先部による切削、左右に傾きを設けたチップポケット部の影響を主とするバリの形成がみられ、初期設計での目標が満たされたことから、微細工具として十分機能することが把握できた。

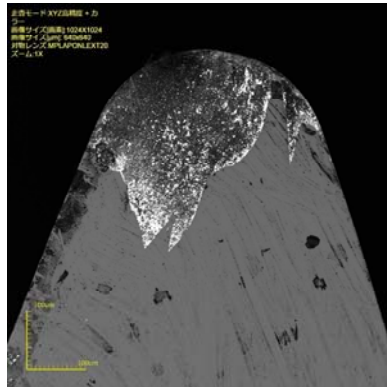
### (5) テクスチャを付与したすくい面を持つ単結晶ダイヤモンド工具の切削性能

(3)によって、テクスチャ創成が十分可能なことが明らかになったことを受け、実際の単結晶ダイヤモンドRバイトに対し、図9, 10に示した加工と同様な条件ですくい面にテクスチャ加工を施した。図12に慣用工具とテクスチャ加工を施した工具の比較を示す。なお、テクスチャを付与した工具は、レーザー加工後の観察時の事故によって、先端部分が欠けてしまっている。

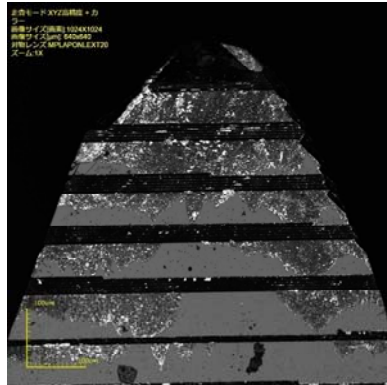
図12より、矩形型凹部の幅 $40 \mu\text{m}$ 弱(深さ約 $5 \mu\text{m}$ )、間隔 $60 \mu\text{m}$ 強のテクスチャ創成が行なえている様子がよくわかる。

これら2種類の工具を用い、アルミニウム(A1085)に対し、切削速度 $200 \text{m/min}$ 、切込み深さ $10 \mu\text{m}$ 、ドライ環境にて連続切削を実施した。距離 $141 \text{km}$ を切削した後の工具すくい面の観察結果を図13比較して示す。

図13より、テクスチャの有無によらず、凝着はみられるものの、慣用工具では刃先先端部に構成刃先のような顕著な凝着がみられるのに対し、テクスチャを付与した場合、刃先先端部の凝着は比較的少ないこと



(a) 慣用工具



(b) テクスチャ工具

図 13 141 km 切削後の工具すくい面

がわかる。また、矩形型凹部を避けるように、比較的広い範囲に僅かな凝着が生じていることがわかる。このことから、テクスチャの効果によって、切りくずの断続的接触が実現され、見た目の接触長さは長くなるものの、切りくずカーブ半径は大きくなり、ひずみも小さくなる効果が得られたものと考えられる。よって、テクスチャの付与により、凝着の低減と切りくずひいては工作物へのひずみの低減をもたらす効果が期待できることがわかる。

#### 〔研究成果のまとめ〕

ピコ秒パルスレーザーによる単結晶ダイヤモンド工具刃先の成形とテクスチャ加工の実現を検討した。パルスエネルギー、走査速度、走査回数といった条件が加工溝寸法に及ぼす影響を明らかにした上で、工具先端の成形を試みた結果、研磨では難しい複雑な形状であっても、数  $\mu\text{m}$  の寸法精度で成形が可能であることを明らかにした。さらに、表面テクスチャの創成も十分可能なことを明らかにした。そして、すくい面にテクスチャを付与した単結晶ダイヤモンド工具を実施に製造し、実切削による性能評価を試みたところ、慣用工具に比べて凝着が低減し、加工ひずみの低減にもつながることが示され、テクスチャの有効性も確認された。

今後、さらに工具先端の成形やテクスチャ

創成における送りをはじめとするレーザー加工条件が最適化されれば、実用レベルの工具製造も可能になるものと期待できる。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

- ① J. Shimizu, K. Uezaki, L. Zhou, T. Yamamoto, T. Onuki, H. Ojima, 『Molecular Dynamics Simulation of a Cutting Method by Making Use of Localized Hydrostatic Pressure』, *Advanced Materials Research*, Vol. 1136, pp.156-161, 2016.1, 査読有, 10.4028/www.scientific.net/AMR.1136.156
- ② 清水 淳, 『茨城大学 ナノ・マイクロ表面機能研究室』, *トライボロジスト*, Vol. 60, pp.373-374, 2015. 5, 査読無
- ③ 清水 淳, 『切削加工によるテクスチャリング』, *トライボロジスト*, Vol. 60, pp. 177-183, 2015. 3, 査読無
- ④ T. Onuki, I. Murayama, H. Ojima, J. Shimizu, L. Zhou, 『Modeling of process mechanisms in pulsed laser micro machining on lithium niobate substrates』, *International Journal of Automation Technology*, Vol. 8, pp. 896-902, 2014. 11, 査読有
- ⑤ K. Uezaki, J. Shimizu, L. Zhou, 『Development of metal cutting process accompanied by a localized compressive hydrostatic stress field formation: Examination by molecular dynamics simulation』, *Precision Engineering*, Vol. 38, pp.371-378, 2014. 4, 査読有, 10.1016/j.precisioneng.2013.12.002
- ⑥ J. Shimizu, T. Yamamoto, L. Zhou, T. Onuki, H. Ojima, 『Development of Microtextured Photocatalytic Surface by Vibration-assisted Scratching』, *Materials Science Forum*, Vols. 783-786, pp. 1662-9752, 2014. 4, 査読有, 10.4028/www.scientific.net/MSF.783-786.1488
- ⑦ 周 立波, 清水 淳, 小貫哲平, 尾畷裕隆, 山本武幸, 『日本縦断研究室巡り「茨城大学 Nano-Engineering Laboratory (nLab)」』, *レーザー協会誌*, Vols. 706-709, pp. 33-35, 2014. 5, 査読無
- ⑧ J. Shimizu, L. Zhou, T. Yamamoto, H. Ojima, T. Onuki, H. Huang, 『Mold Pattern Fabrication by Nanoscratching』, *International Journal of Automation Technology*, Vol. 7, pp. 686-693, 2013. 11, 査読有
- ⑨ W. Hang, L. Zhou, J. Shimizu, J. Yuan, T. Yamamoto, 『Study on the mechanical properties of lithium tantalate and the

influence on its machinability』, International Journal of Automation Technology, Vol.7, pp. 644-653, 2013.11, 査読有

- ⑩ J. Shimizu, L. Zhou, T. Yamamoto, H. Huang, 『Fabrication of Surface Microtexture by Vibration Assisted Cutting』, Advanced Materials Research, Vol.797, pp.638-641, 2013.9, 査読有, 10.4028/www.scientific.net/AMR.797.638

[学会発表] (計 14 件)

- ① J. Shimizu, 『Surface Texturing by Using Vibration-assisted Micro-scratching』, International Tribology Conference 2015, 2015.9.17, 東京理科大学 (東京都・葛飾区)
- ② 清水 淳, 『研削シリコンウエハ加工変質層のナノインデンテーション』, 砥粒加工学会学術講演会, 2015.9.10, 慶應義塾大学 (日吉) (神奈川県・横浜市)
- ③ 山本武幸, 『ピコ秒レーザーによる単結晶ダイヤモンドの精密加工 - 簡単な表面テクスチャの創成 -』, 精密工学会秋季大会, 2015.9.6, 東北大学 (川内北) (宮城県・仙台市)
- ④ 清水 淳, 『振動援用引っかきによる表面微小テクスチャリング』, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議, 2015.5.16, 姫路商工会議所 (兵庫県・姫路市)
- ⑤ 清水 淳, 『振動援用引っかきによる掘起しを利用した表面微小テクスチャリング』, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議, 2014.11.7, アイーナいわて (岩手県・盛岡市)
- ⑥ 山本武幸, 『ピコ秒レーザーによる単結晶ダイヤモンドの精密加工-マイクロ溝加工の検討-』, 精密工学会秋季大会, 2014.9.16, 鳥取大学 (鳥取県・鳥取市)
- ⑦ T. Onuki, 『Comparative investigations of analysis methods in thickness inspections of ultra thin semiconductor wafers by means of white light reflectometry』, 15th International Conference on Precision Engineering, 2014.7.24, ホテル日航金沢 (石川県・金沢市)
- ⑧ T. Onuki, 『Control of the incubation effects in pulsed laser micro machining on ferroelectric lithium niobate substrates』, 6th Int'l Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 2013.11.7, ホテル松島大観荘 (宮城県・松島町)

- ⑨ 清水 淳, 『掘起しの有効活用による表面微小テクスチャの創成』, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議, 2013.10.24, アクロス福岡 (福岡県・福岡市)

- ⑩ 山本武幸, 『微小テクスチャ金型の開発とその応用 (第3報) - 圧子の稜を用いた微小切削によるテクスチャパターンの複雑化 -』, 精密工学会秋季大会, 2013.9.12, 関西大学 (千里山) (大阪府・吹田市)

[その他]

ホームページ

<https://sites.google.com/site/nlabibara-kiuniv/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山本 武幸 (YAMAMOTO Takeyuki)  
茨城大学・工学部・技術職員  
研究者番号: 40396594

### (2) 研究分担者

清水 淳 (SHIMIZU Jun)  
茨城大学・工学部・教授  
研究者番号: 40292479

周 立波 (ZHOU Libo)  
茨城大学・工学部・教授  
研究者番号: 90235705

小貫 哲平 (ONUKI Teppei)  
茨城大学・工学部・准教授  
研究者番号: 70400447

尾畷 裕隆 (OJIMA Hirotaka)  
茨城大学・工学部・講師  
研究者番号: 90375361