

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月20日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360062

研究課題名（和文） 自転／公転型研磨法による高精度形状修正研磨の研究

研究課題名（英文） Study on the Height Precision Compensation Polishing with an Rotation &amp; Revolution Type Polishing Method

研究代表者

林 偉民 (LIN WEIMIN)

群馬大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：60321840

研究成果の概要（和文）：

本提案研究は光学部品や高精度金型部品の高精度、安定的な研磨加工法のための新しい研磨法である自転／公転型研磨法を提案した。本研究において、自転／公転型研磨法の原理を明らかにし、自転／公転型研磨ユニットを試作した。また、試作した研磨装置による研磨実験を行い、ガラス材料や金型材料を対象に基礎研磨実験を行った。各種研磨実験により研磨加工効果の確認と共に、研磨加工除去量の安定性の確認を行い、高精度形状修正研磨法として応用できることを確認した。

研究成果の概要（英文）：

In this study, a new polishing that the rotation & revolution type polishing method (RRP) has been proposed. The principle of polishing and the influence of tools wear were discussed. A RRP unit has been developed for the fundamental polishing experiment. In the polishing experiments, glass or die steel workpieces were polished with free abrasive. The results of experiment show that this tool can process a workpiece with good surface roughness and high processing efficiency in the limited dimension of the machine tool.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2011年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2012年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：機械工作・生産工学，加工学，精密研磨，精密部品加工，修正研磨加工，砥石，固定砥粒研磨，超音波援用研磨

### 1. 研究開始当初の背景

近年、ナノメートルレベルの精度を持つ超精密光学素子が様々な分野で必要とされている。例えば青紫色レーザーを用いた光ディスク（ブルーレイ ディスクなど）のピックアップ光学系に使用されるレンズは、高い N.A. 値を持つため、100nm 以下の高い形状精度と

表面粗さ Ra 数 nm 以下を傾斜角度が 70 度を超える深い形状に対して実現することが求められている。また、天文科学分野では口径が数十メートルの天体観測用天文望遠鏡の建設が各国で計画されており、主鏡ミラーの高精度・高効率の製造方法の開発が求められている。今までに、こうした超精密光学部品

の製造プロセスは、主に超精密研削加工により形状加工を行ってから、職人による研磨加工が行われている。実際に、研磨関係の後継者の減少や大型ミラー需要の拡大により、コンピュータ制御による安定的な研磨加工ができる加工法の開発は喫緊な課題となっている。しかし、伝統的な研磨加工法では軟らかい研磨ツールを用いて、加工物間と遊離砥粒を介して相対運動をさせ、加工物表面の凹凸がわずかながら時間をかけて除去する原理となっている。このような研磨加工において、除去量の不均一性や時間に対する不安定性を加え、研磨時間の進行につれて、研磨面の粗さが向上する一方で加工物の形状精度が低下してゆく問題が残っている。そこで、本提案では、今までの研磨法と異なり、円筒（パイプ）形状の研磨ツールを用いて、加工中のツールに自転と公転運動を同時に加えることによって、研磨加工エリア（除去量）が安定に維持されながら、コンピュータ制御により加工面をスキャンし、加工物の全面に高精度な加工の実現を目指している。

## 2. 研究の目的

本提案は研磨加工を必要とする光学部品や高精度金型部品の高精度、安定的な研磨加工法の確立を目指す研究である。本研究において、定圧方式研磨の加工原理に基づき、円筒（パイプ）形状の加工ツールを用い、加工ツールが自転しながら接触面の中心を通す軸周りに公転運動が行う特徴をもつ。この研磨法において研磨ツールの形状が自動的に修正しながら安定的な研磨加工ができ、光学部品などに使用するガラス材料を対象に実証行う。研磨実験において、ツールが移動しない場合の研磨加工エリア（スポット）の安定性や加工面品位の確認を行う。その後コンピュータ制御によるツールの滞在時間制御を行い、時間分布に応ずる修正研磨の可能性を探る。また、研磨ツールを砥石に変え、固定砥粒による砥石研磨の可能性についても調査する。最終的には、安定的な研磨加工ができる高精度形状修正研磨法の確立を目指す。

## 3. 研究の方法

提案した図1に自転／公転型研磨法の原理を示す。パイプ状研磨ツールを用いて、その軸線周りに回転する自転運動を行う。ツール軸は、ワークの法線に対して少し傾いている。ツールの端面とワークの接触面の中心を通る軸周りに公転運動を同時に行う。自転軸は公転軸に対して $\theta$ だけ傾いており、この2つの軸は、同一の平面内にあるようにする。ツール面は円錐面ないし球面であり、ワークと接触するのは公転軸上の先端部である。また、公転軸がツールとワークとの接触領域の中心部を通り加工面に垂直となるように、ツ

ールを調整する。このような構造とすることによって、研磨加工中にワークとの接触領域内のツールの走行軌跡の方向を連続的に変化させて、研磨軌跡の等方性と、軌跡密度の均一性を高めようというものである。

提案した新しい研磨法が安定的に実験できるように自転公転型研磨ユニットの設計・製作を行った。図2に試作した自転／公転型研磨実験装置を示す。加工機本体は分解能が $0.1\mu\text{m}$ をもつ卓上三次元加工機を使用した。門型構造でX、Y平面の設置スペースが $200\times 200\text{mm}$ であり、大きな研磨物の設置も可能であった。また、PNC制御によりX、Y、Zの三つの直線移動軸の同時制御ができ、将来に行う修正研磨試験に適している。

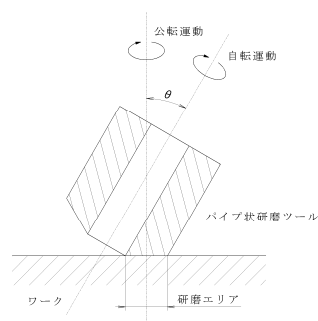


図1 自転／公転型研磨法の原理

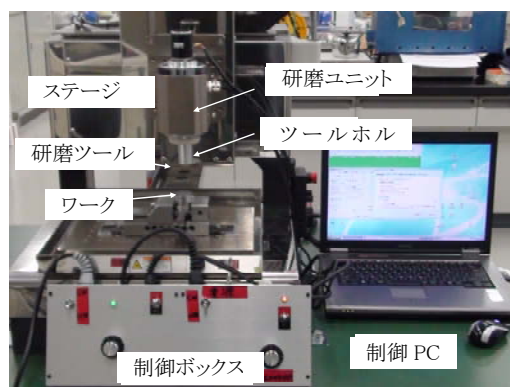


図2 自転／公転型研磨装置の外観

表1 主な研磨実験条件

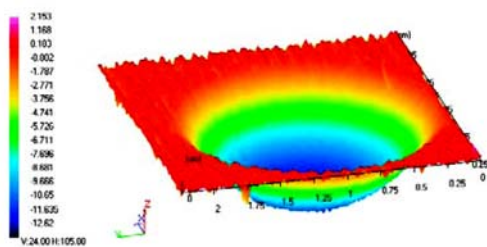
ワーク	SUS420
自転回転数	600rpm
公転回転数	200rpm
自転軸／公転軸交角	$5^\circ$
研磨ツール	ポリ尿素樹脂
使用砥粒	#3000WA
研磨荷重	200g
砥粒供給量	0.05g
研磨時間	10, 15, 20 min

試作した自転／公転型研磨実験装置によ

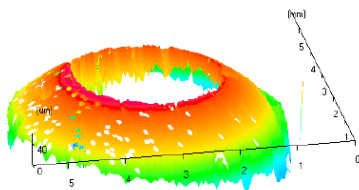
り研磨特性の確認実験を行った。ワークはSUS420材料を使用し、研削仕上げによって表面粗さがRa 2.3 $\mu$ m程度に仕上げられている。研磨特性および研磨エリアの安定性を明らかにするために一定時間で研磨した研磨痕を対象にし、非接触形状測定装置で測定した。図3(a)に測定した研磨エリアの3-Dイメージを示す。また、図3(b)に研磨ツールの先端部分の測定例を示す。研磨ツール及び研磨エリアは球面形状であることが分かった。本研究において測定データから研磨エリアの中心を通る断面プロファイルを取り出し、研磨痕直径および研磨深さを定義して、その変化を調べた。また、参考に研磨中に研磨エリア内の粗さ変化も白色光干渉顕微鏡で測定した。研磨開始時は、あらかじめ研磨ツールのツールイングを行い、ワークと確実に接触できるように準備した。砥粒は研磨前に約0.05gを供給し、測定に合わせて5分間隔で更新した。また、おもな研磨条件を表1に示し、研磨用ツールの材質を表2に示す。また、研磨の安定性を確認するため研磨ツールをワーク表面の一箇所に固定し、研磨時間の推移と研磨痕(エリア)の変化や除去深さの変化を調べた。それぞれの時間で研磨を5回ずつ行い、安定性を確認するために同じ条件で他の実験者による研磨実験も行い、比較に取り入れた。

表2 研磨ツールの特徴

ツール標記	特徴
CM	ポリ尿素樹脂, 硬め
BM	ポリ尿素樹脂, 中間硬さ
300A'	ポリ尿素樹脂, 軟らかめ
GC3000A'50	300A'に#3000GC 砥粒添加



(a) 研磨エリア形状



(b) 研磨工具先端形状

図3 研磨エリア及び工具先端の一例

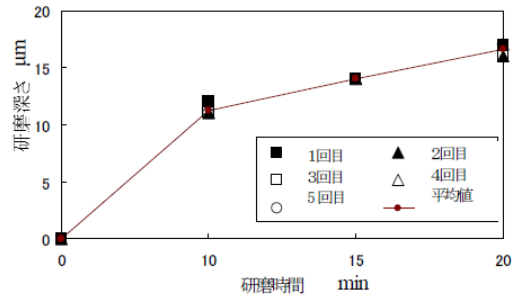
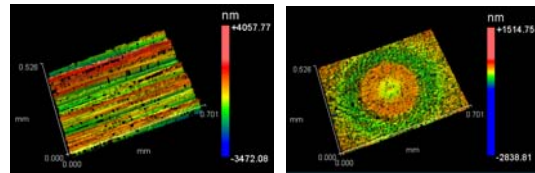


図4 研磨深さの安定性



(a) 研磨加工前 (b) 15分研磨後  
図5 研磨エリアの表面性状測定例

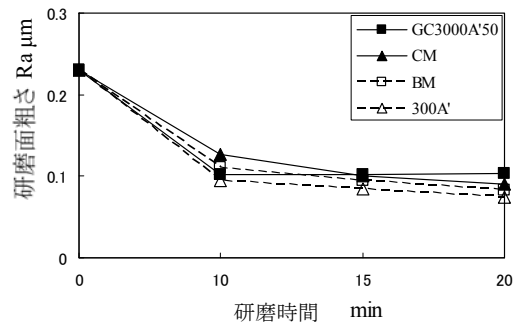


図6 研磨エリアの表面性状変化

図4に研磨の除去深さと研磨時間の関係を示す。除去深さは研磨時間の増加につれて増加するが、5分間研磨以降増加量が低下している。これは研磨荷重が一定である状態で、研磨時間が進むと共に研磨痕が大きくなっていくために、平均研磨圧力が低下していくことが原因と考えられる。また、除去深さは5分間研磨のときは安定しているが10分研磨以降ではばらつきがあり、15分間研磨のとき最大で4.9 $\mu$ mであった。研磨エリア直径も研磨時間が経過するにつれて増加していることがわかる。各回実験でのばらつきは最大で5分間研磨のときに175 $\mu$ mであった。

研磨痕直径や除去深さにばらつきが生じた原因として、研磨ツールの砥粒の保持能力が関係していると思われる。各実験での砥粒の供給量は毎回0.05gずつにしているが、実験直後の研磨面をみると砥粒が研磨エリアから逃げてしまっていた。このことにより、エリア内での砥粒の分布が不均一になって実験結果にばらつきが生じてしまった原因と考えられる。

図5は白色光干渉式粗さ測定装置で測定したワークの初期表面粗さと15分間研磨後の表面粗さである。初期表面は研削痕が見られるが、15分間研磨後は研削痕が消えているのがわかる。15分間研磨実験において研磨後Ra0.12 $\mu$ mの加工面粗さが得られた。図6に研磨実験における表面粗さの変化を示す。各種研磨ツールによる研磨した研磨エリアの表面粗さは研磨時間とともに改善されていることがわかる。また、除去深さと同様に5分間研磨以降は粗さの変化量が小さくなる傾向を示している。

また、修正研磨への応用に向け、研磨ツールが均一に研磨面の全面をスキャンすることによる研磨サンプルの全面研磨加工実験を行った。図7にその結果である測定した研磨エリアの断面形状の一例を示す。送り速度は0.5mm/sの研磨条件において、5 $\times$ 8mmの研磨範囲において研磨前の平面形状に対して、研磨後も高い平面度の再現が得られる結果になった。今後はさらに研磨ツールの滞在時間制御を行い、高精度形状修正研磨の検証実験を行う。

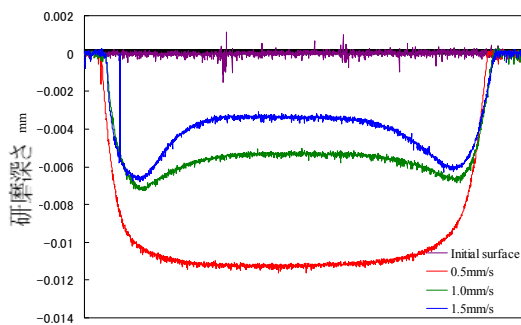


図7 ツールを走査させた場合の研磨面形状

#### 4. 研究成果

本研究では、パイプ状研磨ツールを用いて、ツールの端面を加工面に接触させ、ツールの軸線を加工面法線とある程度傾き、ツールが軸線周りに回転する自転運動と加工面の中心に通る法線の周りに回転する公転運動を同時に実現させる新しい自転/公転型研磨法を提案した。この研磨法において研磨ツールの形状が自動的に修正しながら安定的な研磨加工ができることを理論上実証できた。

また、自転/公転型研磨ユニットの試作・改良を行い、自転及び公転運動が単独に制御できる実用的な自転/公転型ユニットを試作し、それによる研磨実験を行い、基礎的な研磨特性を確認した。

研磨仕上げが必要とする超精密光学部品やその金型に使用するガラス材料や金型材料を対象に実証を行った。金型材料対象に行った研磨実験において、ツールが移動しない場

合の研磨加工エリア（スポット）の安定性や加工面品位の確認を行い、以下に示す結論が得られた。

(1)基礎的な研磨実験を行い、自転/公転型研磨法により安定的な研磨加工が可能であり、当初の想定通り、研磨痕の少ない等方的な研磨が可能であることが判明した。

(2)ポリ尿素樹脂を研磨ツールとして使用し多場合、安定的な研磨ができ、研磨痕の直径のばらつき及び除去深さのばらつきは理論値に近い安定的な研磨ができることが分かった。

(3)また、研磨エリアの表面粗さは研磨時間の推移に伴い向上され、良好な数値を得ることができた。

また、ガラス材料に対しても自転/公転型研磨による基礎研磨実験を行い、研磨エリアの安定性や研磨仕上げ面粗さの安定性を共に確認できた。

一方、高能率的な研磨を考える場合、固定砥粒による研磨が必要となり、微細砥粒を保持できる弾性砥石の試作検討や化学反応を援用したChemo-Mechanical Grinding (CMG) 砥石による研磨の安定性実験も行った。実験結果から自転/公転型研磨法において固定砥粒(砥石)を用いた場合でも遊離砥粒と同等な表面性状が得られ、研磨の安定性も優れることを確認できた。

これらの実験によって、ガラス材料、金型鋼、無電解NiPメッキ材料の遊離砥粒や固定砥粒による自転/公転型研磨法の基礎研磨データの蓄積を行い、実用化のためのデータベースを構築できた。

また、研磨ツールを走査させて研磨面の全面研磨の実験においても安定的な研磨加工ができ、高精度の修正研磨への応用は可能と判断できた。

以上の実験結果から、提案した自転/公転型研磨法は、遊離砥粒のみならず、固定砥粒による研磨も安定的な研磨が可能であった。今後コンピュータ制御によるツールの滞在時間制御を行い、時間分布に応ずる修正研磨の可能性を探り、最終的には、安定的な研磨加工ができる高精度形状修正研磨法の確立を目指し、X線光学素子や中性子反射ミラーなど高精度光学素子の製造プロセスに応用したいと考えている。

#### 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9件)

1. 林偉民: “自転/公転型研磨法の研究”, 型技術, 26, 12 (2011) 70-71. 【査読無】
2. 林偉民: “自転/公転型研磨法の研究”, 日本機械学会誌, 115, 4 (2012) 44. 【査読無】

3. 林偉民, 大村元志, 藤本正和, 吳勇波, 山形豊: “自転／公転型研磨法の新提案と高精度形状研磨の基礎研究”, 砥粒加工学会誌, 56, 6 (2012) 44-49. 【査読有】
  4. 林偉民, 徐世傑, 矢野健, 藤本正和, 吳勇波, 鈴木浩文, 樋口俊郎: “低周波振動援用による微細構造を持つ金型の研磨法の研究”, 型技術, 27, 7 (2012) 118-119. 【査読無】
  5. Y. G. Li, Y. Wu, L. Zhou, H. Guo, J. Cao, M. Fujimoto, M. Kemmochi: “Investigation into Chemo-Mechanical Fixed Abrasive Polishing of Fused Silica with the Assistance of Ultrasonic Vibration, Key Engineering Materials”, 523-524, (2012), 155-160. 【査読有】
  6. Yaguo Li, Yongbo Wu, Libo Zhou, Masakazu Fujimoto, Jian Wang, Qiao Xu, Shoichi Sasakil, and Masaaki Kemmochi: “Chemo-Mechanical Manufacturing of Fused Silica by Combining Ultrasonic Vibration with Fixed-Abrasive Pellets”, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 13, 12 (2012) 2163-2172. 【査読有】
  7. Yaguo Li, Yongbo Wu, Jian Wang, Wei Yang, Yinbiao Guo and Qiao Xu: “Tentative investigation towards precision polishing of optical components with ultrasonically vibrating bound-abrasive pellets”, Optics Express, 20, 1 (2012), 568-575. 【査読有】
  8. Sze Keat Chee, Hirofumi Suzuki, Takeshi Yano, Toshiro Higuchi and Weimin Lin: “Development of Micro Polishing System Using Piezoelectric Actuator Incorporated with Mechanical Amplitude Magnified Mechanism”, International Journal of Automation Technology (IJAT), 7, 1 (2013) 71-82. 【査読有】
  9. Weiping Yang, Yongbo Wu and Jun Liu: “Experimental Investigation on Hybrid Technology of Ultrasonic Vibration Assisted Chemo-Mechanical Grinding (CMG) Silicon Wafer”, Applied Mechanics and Materials, 275-277 (2013), 2290-2294. 【査読有】
- [学会発表] (計 21 件)
1. Yaguo Li, Yongbo Wu: “Precision Manufacturing of Fused Silica Glass by Combining Bound-Abrasive Polishing with Ultrasonic Vibration”, 6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies (AOMATT 2012), (2012.4.27) Xiamen, China.
  2. Yaguo Li, Yongbo Wu, Masakazu Fujimoto, Libo Zhou: “Polishing fused silica glass by incorporating ultrasonic vibration into fixed abrasive polishers”, the 12th euspen International Conference (2012.6.22) Stockholm.
  3. Weimin Lin, Chee Sze Keat, Takeshi Yano, Hirofumi Suzuki, and Toshiro Higuchi: “Study on die polishing method of micro structured molds applying low frequency vibration”, The 3rd International Conference on Nanomanufacturing (nanoMan2012), (2012.7.27) Tokyo, Japan.
  4. Yaguo Li and Yongbo Wu: “Hybrid Polishing of Fused Silica Glass with Bound-Abrasive Polishers in Conjunction with Vibration”, SPIE, (2012.8.20) USA.
  5. Yongbo Wu, Weiping Yang, Masakazu Fujimoto: “A feasibility study of silicon wafer edge treatment by ultrasonic assisted fixed-abrasive CMP (UF-CMP)”, the International Conference of Manufacturing Technology Engineers 2012, (2012.10.10) Seoul, Korea.
  6. 林偉民, 大村元志, 小林直貴, 吳勇波, 藤本正和, 山形豊: “自転／公転研磨法の基礎検討”, 砥粒加工学会 ABTEC2010, (2010.8.28) 岡山.
  7. 大村元志, 佐藤康成, 林偉民, 藤本正和, 吳勇波: “自転／公転研磨法による研磨加工の基礎検討”, 2010 年度精密工学会東北支部学術講演会, (2010.11.27) 盛岡.
  8. 小林直貴, 久保田亨, 林偉民, 藤本正和, 吳勇波, 徐世傑, 矢野健, 山形豊, 樋口俊郎, 鈴木浩文: “低周波振動援用研磨における金型材料の研磨効果”, 2010 年度精密工学会東北支部学術講演会, (2010.11.27) 盛岡.
  9. 小林直貴, 久保田亨, 林偉民, 吳勇波, 藤本正和, 徐世傑, 矢野健, 山形豊, 樋口俊郎, 鈴木浩文, 牧野俊清: “低周波振動援用研磨による金型材料の加工特性”, 2011 年度精密工学会春季大会学術講演会, (2011.3.16) 東京.
  10. 林偉民, 小林直樹, 藤本正和, 吳勇波, 徐世傑, 矢野健, 鈴木浩文: “低周波振動援用研磨法による金型材料の加工効果”, 2011 年度砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2011), (2011.9.8) 春日.

11. 林偉民, 大村元志, 藤本正和, 呉勇波, 山形豊: “自転/公転型研磨法による修正研磨法の基礎研究”, 2011年度砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2011), (2011.9.8) 春日.
  12. 大村元志, 佐々木宇宙, 藤本正和, 呉勇波, 林偉民: “自転/公転型研磨法による加工特性について”, 2011年度精密工学会東北支部学術講演会, (2011.10.21) 仙台.
  13. 小林直貴, 佐藤光平, 藤本正和, 呉勇波, 林偉民, 徐世傑, 矢野健, 山形豊, 樋口俊朗, 鈴木浩文, 牧野俊清: “低周波振動を援用した自転/公転型研磨法の開発に関する基礎検討”, 2011年度精密工学会東北支部学術講演会, (2011.10.21) 仙台.
  14. 林偉民: “自転/公転型研磨法の研究”, 型技術ワークショップ 2011in 岐阜, (2011.11.21) 岐阜.
  15. 林偉民, 藤本正和, 呉勇波: “自転/公転型研磨法研磨加工安定性の検討”, 2012年度砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2012), (2012.8.31) 京都.
  16. 林偉民, 徐世傑, 矢野健, 藤本正和, 呉勇波, 鈴木浩文, 樋口俊郎: “低周波振動テーブルの試作とそれによる振動援用研磨効果”, 2012年度精密工学会秋季大会学術講演会, (2012.9.15) 北九州.
  17. 李亜国, 呉勇波, 藤本正和, 周立波: “超音波援用固定砥粒加工による石英ガラスのポリシング”, 日本機械学会第9回生産加工・工作機械部門講演会, (2012.10.28) 由利本荘.
  18. 宇野文智, 呉勇波, 藤本正和, 野村光由, 周立波: “超音波援用化学機械複合固定砥粒加工による Si ウェハの高効率鏡面加工”, 日本機械学会第9回生産加工・工作機械部門講演会, (2012.10.28) 由利本荘.
  19. 林偉民, 森田晋也, 山形豊: “中性子ミラーの超精密研磨”, 2012年度日本機械学会第9回生産加工・工作機械部門講演会講演, (2012.10.28) 由利本荘.
  20. 林偉民, 徐世傑, 矢野健, 藤本正和, 呉勇波, 鈴木浩文, 樋口俊郎: “低周波振動援用による微細構造を持つ形状物の研磨”, 2012年度日本機械学会第9回生産加工・工作機械部門講演会, (2012.10.28) 由利本荘.
  21. 林偉民, 森田晋也, 山形豊: “金属製中性子ミラーの研磨”, 2012年度日本機械学会材料加工部門講演会 MP2012, (2012.12.1) 大阪.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
林 偉民 (LIN WEIMIN)  
群馬大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 60321840
  - (2) 研究分担者  
藤本 正和 (FUJIMOTO MASAKAZU)  
秋田県立大学・システム科学技術学部・助教  
研究者番号: 00581290
  - 呉 勇波 (WU YONGBO)  
秋田県立大学・システム科学技術学部・教授  
研究者番号: 10302176
  - (3) 連携研究者  
なし