

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420044

研究課題名(和文) 金属製中性子集光ミラー基板の超精密加工法の研究

研究課題名(英文) Study on the ultra-precision machining method of metal mirror substrate for neutron reflection

研究代表者

林 偉民(LIN, Weimin)

群馬大学・理工学府・教授

研究者番号：60321840

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本提案研究は小型・可搬式中性子源の研究開発における中性子集光用、金属製中性子集光ミラー基板の超精密加工法の確立を目的としている。中性子用斜入射集光ミラーは設計された楕円面形状に対して、高い精度をもつとともに、高い表面粗さ(Ra0.3nm以下)の確保が必要である。本研究では形状創成能力の高いNiP製ミラー基板をターゲットにし、ダイヤモンドバイトより超精密切削加工で形状創成を行い、回転工具によるスキャン研磨法によるミラー基板の超精密仕上げを行い、中性子ミラー基板の加工が可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a new ultra-precision machining method of metal mirror substrate for neutron reflection has been proposed. The neutron reflection has designed to ellipsoidal shape. It is necessary to secure a high surface roughness (less than Ra0.3nm) and higher form accuracy. In this research, the process of ultra-precision diamond turning and super smooth polishing process had been developed. In the polishing, using a rotation & revolution type polishing method (RRP), a good surface roughness of mirror substrate for neutron reflection can be created.

研究分野：工学

キーワード：機械工作・生産工学 精密研磨 精密部品加工 超精密計測 粒子線 ハイブリッド加工プロセス

1. 研究開始当初の背景

中性子は、X線では解析が困難な生体物質などの軽元素系、特に水素などの解析で不可欠な解析手段である。しかし、中性子の利用はX線などに比べて遅れている。その主な要因として中性子ビームはX線に比べて極端に弱いため、実用的な研究への取り組みが遅れている。強力的な中性子源の建設と同時に、中性子ビームを光学的に制御し、中性子の利用効率を向上させる研究を同時に進むことで中性子応用の普及につながる。中性子光学素子の開発によって、中性子利用が広がり、また、小型可搬タイプの中性子源の開発や産業界への中性子の応用が可能になり、経済波及効果が大きい。

本研究では、金属製中性子ミラーの使用を提案し、ミラー基板が安価で高精度、高能率形状加工に非常に優れている。仕上げ加工に研磨法を使用しますが、今までの研究開発に得られた経験で、超精密研磨の実現が見込まれている。通常、金属や軟性材料の研磨加工において、前加工の加工痕跡や結晶粒内の材料加工性の不均一に起因する選択除去現象が発生するとされているが、提案者が所属する研究グループでは前加工の形状加工と仕上げ加工の研磨加工を一体にとらえ、ハイブリット加工プロセスによる高品位の加工が可能となっている¹⁾。また、曲面形状のミラー基板の高精度研磨において測定したミラーの形状精度に応じ、修正研磨を行う必要がある。提案者が先行して安定的に研磨ができる自転/公転型研磨法²⁾提案研究を行い、自転/公転型研磨法による金属製中性子ミラー基板の超精密研磨効果確認もできる。

2. 研究の目的

本提案は小型・可搬式中性子減の研究開発における中性子集光用中性子集光ミラー基板の超精密加工法の確立を目指す。

本研究期間内において、無電解ニッケルメッキ中性子ミラー基板を製作し、ミラーの性能評価および中性子集光試験を行う。具体的に、 $\phi 50\text{ mm}$ (あるいは $50\text{ mm}\square$) の中性子ミラー基板をダイヤモンド切削により、超精密切削加工を行い、形状精度 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 、表面粗さ $Ra1.0\text{ nm}$ 程度に仕上げる。また、超精密研磨手法を用いて、ミラーの形状精度を落とさないように ($1.0\text{ }\mu\text{m}$ 以下) 研磨し、表面粗さを $Ra0.3\text{ nm}-0.5\text{ nm}$ 程度全面に仕上げる。さらに、自転/公転型研磨法を援用し、小径研磨ツールによる研磨面粗さの向上の方策を探り、表面粗さを $Ra0.3\text{ nm}$ 以下に仕上げ、金属製中性子集光ミラー基板の超精密加工法を確立する。

最終的には、中性子集光用中性子集光ミラー基板の超精密加工プロセスを完成する。

3. 研究の方法

本提案は図1に示すように、今までにガラスや各種単結晶製中性子ミラーの空間高さ方向の厚みが大きいという欠点を克服し、金属製の薄い中性子ミラーを多重に設置し、多重ミラーからなる光学系で中性子の集光効率を上げ、弱い中性子源でも解析に必要となるビーム強度が得られるようになる。本提案研究は小型・可搬式中性子源の研究開発における中性子集光用、金属製中性子集光ミラー基板の超精密加工法の確立を目指している。中性子用斜入射集光ミラーは設計された楕円面形状に対して、高い精度をもつこととともに、高い表面粗さ ($Ra0.3\text{ nm}$ 以下) の確保が必要である。本研究では形状創成能力の高いNiP製ミラー基板をターゲットにし、ダイヤモンドバイトより超精密切削加工を行い、最終的にコンピュータ制御による修正研磨が可能な自転/公転型研磨法を援用し、ミラー基板の形状精度を維持しながら、表面粗さの向上を目指して、中性子ミラーの超精密加工法の確立を行った。

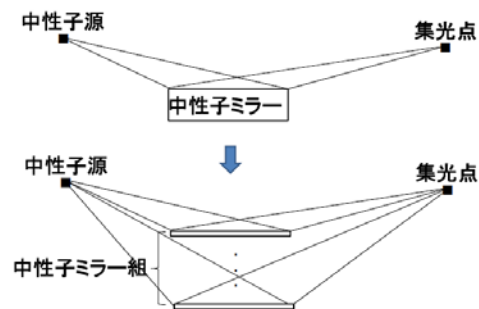


図1 金属製中性子多重ミラー光学系

表1 主な切削加工条件

加工機	超精密4軸加工機 (ULG-100D)
切削工具	単結晶ダイヤモンドバイト (ノーズR 2mm)
加工物	NiP無電解めっき
切り込み量	$2\text{ }\mu\text{m}$
送り	2 mm/min
回転数	560 rpm
切削液	白灯油

本研究に使用する金属ミラー基板は切削や研磨に実績のあるNiPめっきを使用する。厚さ 10 mm で $\phi 50\text{ mm}$ の円盤と $50\text{ mm}\square$ アルミニウム基盤など形状加工しやすい金属ベースに $100-200\text{ }\mu\text{m}$ 程度の無電解NiPめっきをつけて中性子集光ミラー基板にした。また、加工層の硬さ変化状況を把握するために部分のミラー基板を $190\text{ }^\circ\text{C}$ で3時間の熱処理を施

した。

作製したミラーを提案した加工プロセスの通り、まず超精密4軸加工機で平面加工を行い、その後粗研磨、仕上げ研磨の順で実験を行った。ミラー基板の研磨について、仕上げ面粗さが到達できるレベルを確認するために修正輪型研磨機による基礎実験を行った。また、曲面形状ミラーの研磨が行える小径回転ツール走査型研磨法によるミラー基板の全面スキャン研磨加工実験を行った。

3. 1 ダイヤモンドバイトによる無電解NiPめっき基板の鏡面加工

仕上げ研磨のために、 $\phi 50 \text{ mm}$ と 50 mm のNiP中性子ミラー基板を作製し、超精密加工機で単結晶ダイヤモンドバイトによる無電解NiPめっきの鏡面加工を行った。曲面形状を持つミラーの加工において、シェーパー加工やフライカットなどの加工法は有力方法であるが、本研究では旋削方法を取り入れ、研磨の前加工面の創製を行った。表1に主な切削加工条件を示す。

切削加工面を白色光干渉式粗さ測定機による測定し、表面粗さが $Ra2.0 \text{ nm}$ – 1.0 nm 程度に達し、基礎研磨実験に使用することにした。

3. 2 修正輪型研磨機による無電解NiPめっきミラー基板の鏡面研磨

中性子ミラー基板の超精密研磨に研究において、修正輪型研磨機を使用し、切削加工したミラー基板の研磨を行った。

全面研磨を行う前に無電解NiPめっき基板の熱処理の有無による材料特性変化を調査した。熱処理なしと $190 \text{ }^\circ\text{C}$ で3時間熱処理を行ったものの硬さ測定を行った。結果として熱処理有無に関係なく今回のNiPめっきサンプルのめっき層硬さは共に $Hv500$ 程度であることがわかり、大差がない結果となったので、熱処理の有無を区別なしで研磨実験を行った。

表2に修正輪型研磨時の主な研磨条件を示す。研磨加工工程別の表面粗さ Ra の時間変化を図2に示す。図2(a)から粗研磨では研磨圧力 1 kPa よりも 2 kPa 、 3 kPa 、 3.6 kPa の方が表面粗さ Ra の改善が早く、約4分の1程度の時間で改善していることがわかる。研磨時間30分の表面粗さ Ra も、研磨圧力 2 kPa は $Ra0.82 \text{ nm}$ 、研磨圧力 3 kPa では $Ra0.84 \text{ nm}$ 、研磨圧力 3.6 kPa では $Ra0.78 \text{ nm}$ と良い値なのに対し、研磨圧力 1 kPa では $Ra15.12 \text{ nm}$ となっており、他の研磨圧力の表面粗さ Ra よりも悪い値となっていた。図2(b)から仕上げ研磨では研磨圧力 2 kPa と 3 kPa では研磨時間5分で表面粗さ Ra が $Ra0.2 \text{ nm}$ 前後と早く改善しているのに対し、研磨圧力 1 kPa では表面粗さ Ra の改善が非常に緩やかで、研磨時間40分が経過しても表面粗さ Ra が

$Ra0.58 \text{ nm}$ までしか改善しなかった。

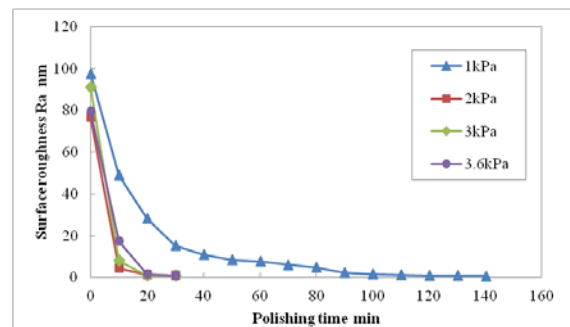
以上のように研磨条件を適切に選択すれば、無電解NiPめっき基板の研磨仕上げ面粗さが $Ra0.3 \text{ nm}$ 以下に到達ができ、ミラー基板の全面研磨ができることが分かった。図3に仕上げ研磨後ミラー基板の外観写真を示す。

3. 3 小径回転研磨ツールによる無電解NiPめっきミラー基板の走査研磨

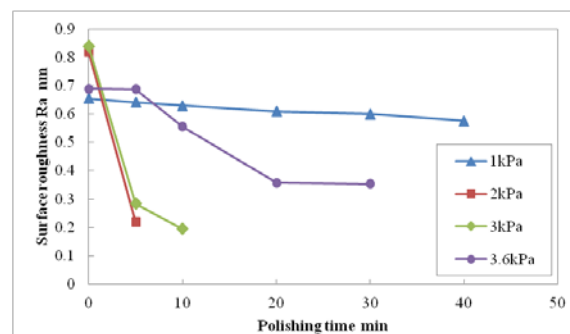
楕円形状曲面を研磨するために、小径な円環工具を用い、NC制御によりミラー基板の走査研磨が必要である。本研究では図4に示すような小型NC制御研磨装置によりミラー基板全面のスキャン研磨を行った。

表2 主な研磨実験条件

	粗研磨	仕上げ研磨
研磨装置	修正輪型研磨機	
ワーク	無電解NiPミラー基板	
研磨パッド	タイプA	タイプB
砥粒	アルミナ ($\phi 0.3 \mu\text{m}$)	コロイダルシリカ ($\phi 23 \text{ nm}$)
スラリー供給量	0.7 ml/min	
研磨圧力	1 kPa, 3.6 kPa	
研磨速度	0.375 m/s (100 rpm)	
研磨時間	5 min, -140 min	



(a) 粗研磨



(b) 仕上げ研磨

図2 無電解NiPめっき基板の研磨面粗さ変化



図3 研磨された無電解NiPめっき基板

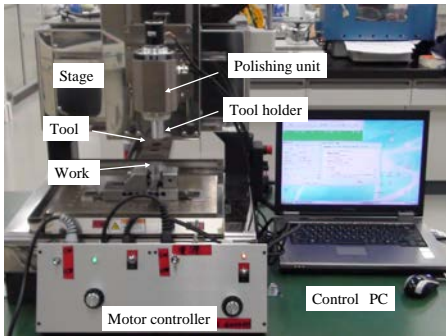


図4 実験に用いたNC制御研磨装置の外観

研磨に先立ち、小径工具の直径やそのツールによる研磨量の基礎調査を行った。

本研究では、まず、外径20mm、内径13mmのドーナツ型の形状研磨ツールを使用し、50mm口の無電解NiPめっきミラー基板で研磨特性の調査を行った。

図5にツールが固定位置で研磨実験を行ったときの研磨エリアの測定結果例を示す。この基礎研磨データをもとにスキャン研磨の間隔、研磨ツールの滞在時間も含めて最適な研磨条件を求めた。また、表3に示す研磨条件でミラー基板の研磨実験を行った。

図6に研磨ツール直径5mm、スキャンピッチが0.5mmのときの研磨工具の滞在時間と研磨面粗さの関係を示す。研磨圧力3kPaよりも研磨圧力25kPaの方が研磨面粗さの改善が早くなることが分かった。

図7にミラー基板の断面形状精度の測定結果の一例を示す。外周部分を除いて切削加工面に対して研磨加工後の形状精度の低下が少ないことが分かった。

また、走査式研磨法の研磨面粗さの向上についても提案した低周波振動研磨法を援用し、研磨の安定性や研磨面粗さの向上に一定の効果が認められた。

図8に最終的に小径研磨ツールによる平面形状ミラー基板の全面スキャン研磨の一例を示す。研磨ツール系や研磨ツールスキャン軌跡の最適化により中性子ミラーの表面粗

さをRa0.3nm全面に仕上げる技術を確立した。

以上のように、本研究では中性子ミラーの最終加工プロセスを確立するために、小径回転研磨工具を用い、コンピュータ制御による修正研磨を行い、ミラー基板の形状精度を維持しながら、表面粗さの向上を目指し、効率的加工可能なプロセスの検討を行い、ミラー基板を製作することができた。

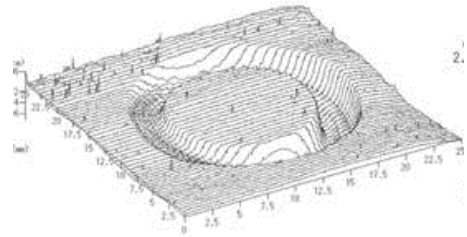


図5 円環状研磨工具による研磨エリアの例

表3 研磨ツールの特徴

加工機	NC制御研磨加工機
研磨サンプル	50×50mmNiP平面基板
研磨パッド	タイプA
研磨スラリー	コロイダルシリカ
研磨ツール	φ5mm
走査ピッチ	0.05mm, 0.5mm, 2.5mm
ツール回転数	300rpm
走査速度	60mm/min
走査回数	1-10回

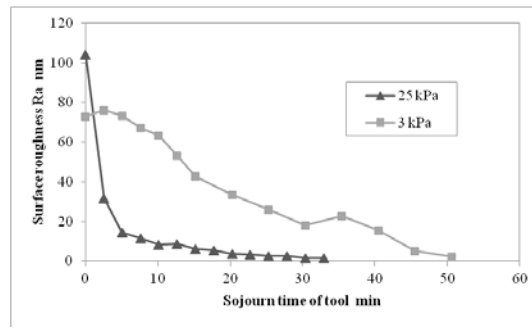


図6 研磨工具の滞在時間と粗さの関係

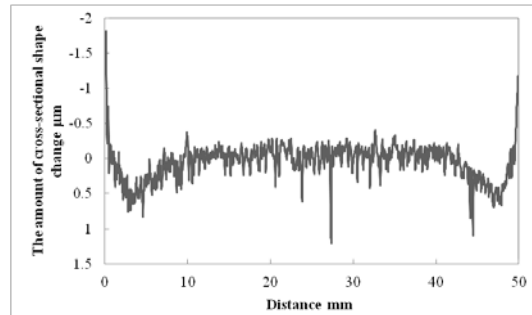


図7 研磨面形状精度測定例

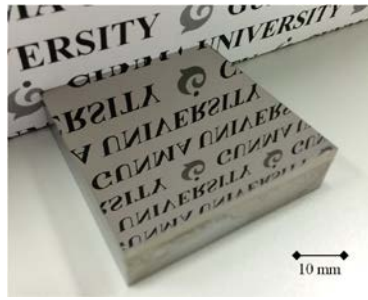


図8 研磨エリアの表面性状変化

4. 研究成果

本提案研究は小型・可搬式中性子源の研究開発における中性子集光用、金属製中性子集光ミラー基板の超精密加工法の確立を目指している。中性子用斜入射集光ミラーは設計された楕円面形状に対して、高い精度をもつこととともに、高い表面粗さ (Ra0.3nm 以下) の確保が必要である。本研究では形状創成能力の高い無電解 NiP めっき製ミラー基板をターゲットにし、ダイヤモンドバイトより超精密切削加工を行い、最終的にコンピュータ制御による修正研磨が可能な自転/公転型研磨法を援用し、ミラー基板の形状精度を維持しながら、表面粗さの向上を目指して、中性子ミラーの超精密加工法の確立を行った。

本研究では、中性子ミラー基板の候補として使用する無電解 NiP めっき基板を作製し、切削・研磨加工実験を行い、加工面の評価を行った。

中性子ミラー基板の超精密切削加工の研究において、超精密加工機による平面形状の無電解 NiP めっき基板 (φ50mm および 50mm 口) のダイヤモンド切削加工を行い、研磨に使用する表面粗さ Ra2.0nm-1.0nm 程度のサンプルの製作ができた。

また、中性子ミラー基板の超精密研磨の研究において、修正輪型研磨機を使用し、切削加工したミラー基板の研磨実験を行った。粗研磨と仕上げ研磨の 2 工程の研磨実験を行い、NiP の研磨仕上げ面粗さが Ra0.3nm 程度に全面研磨ができた。

さらに、小径研磨ツールによる平面形状ミラー基板の研磨を行った。研磨ツール系や研磨ツールスキャン軌跡の最適化により中性子ミラーの表面粗さを Ra0.3nm 全面に仕上げの技術を確立した。

また、研磨方法も小径研磨工具を用い、NC 制御による研磨面の変化について検討を行った。工具のサイズや走査軌跡の最適化により、平面ミラーの高精度研磨ができるようになった。

走査式研磨法の研磨面粗さの向上についても提案した低周波振動研磨法を援用し、研磨の安定性や研磨面粗さの向上に一定の効果が認められた。最終的には小径回転研磨工具を

用いて、50mm 口の無電解 NiP めっきミラー基板の研磨に成功した。

以上のように、本研究では中性子ミラーの最終加工プロセスを確立するために、小径回転研磨工具を用い、コンピュータ制御による修正研磨を行い、ミラー基板の形状精度を維持しながら、表面粗さの向上を目指し、効率的加工可能なプロセスの検討を行い、ミラー基板を製作することができた。

<引用文献>

- 1) 大森 整, 尹 韶輝, 林 偉民, 上原 嘉宏: ELID 研削と MRF 磁性流体研磨を相乗した超精密複合プロセスの研究——第一報: ガラスレンズ加工への試み, 砥粒加工学会誌, 50, 1 (2006) 39-44.
- 2) 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, 4 (2012) 44-49.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

1. 佐藤由貴, 西田進一, 林偉民, 渡利久規, 潤滑剤がマグネシウム合金の熱間鍛造に及ぼす効果, 型技術, 30, 12 (2015) 84-85. 【査読無】
2. 麻生逸人, 西田進一, 林偉民, 渡利久規, 高張力鋼板の冷間ロール成形における形状欠陥と FEM 解析, 型技術, 30, 12 (2015) 22-23. 【査読無】
3. 青木義弘, 村田浩一, 高津晋一, 甲本忠史, 久米原宏之, 林偉民, ヘミング工程における予備曲げ条件が製品形状に与える影響, 型技術, 30, 7 (2015) 80-81. 【査読無】
4. 林偉民, ハイブリッド加工プロセスによる超精密加工技術の研究, 群馬大学理工学部 100 周年記念集, (2015) 436-437. 【査読無】
5. H. Suzuki, M. Okada, W. Lin, S. Morita, Y. Yamagata, H. Hanada, H. Araki, S. Kashima, Fine Finishing of Ground DOE Lens of Synthetic Silica by Magnetic Field-Assisted Polishing, Annals of the CIRP, 64, 261-264 (2014). 【査読有】
6. W. Lin, S. K. Chee, T. Yano, H. Suzuki and T. Higuchi, Study on Die Polishing Method of Micro Structured Molds Applying Low Frequency Vibration, International Journal of Nanomanufacturing (IJNM), 10, 5/6 (2014) 424-431. 【査読有】
7. 林偉民, 超精密加工及びその応用に関する研究, 群馬大学産学連携・共同研究イノベーションセンター Center News, (2013) 70-71. 【査読無】

8. W. Lin, S. K. Chee, H. Suzuki and T. Higuchi, Polishing Characteristics of a Low Frequency Vibration Assisted Polishing Method, Advanced Materials Research 797, (2013) 450-454. 【査読有】

〔学会発表〕(計 15 件)

1. 鈴木浩文, 岡田睦, 升田祐樹, 山本琢也, 森田晋也, 郭江, 山形豊, 林偉民, X線望遠鏡成形用Ni金型の超精密加工, 2014年度日本機械学会第10回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, (2014.11.15, 徳島大学) 95-96.
2. 林偉民, 自転/公転研磨ユニットによる砥石研磨の基礎検討, 2014年度日本機械学会第10回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, (2014.11.15, 徳島大学) 93-94.
3. 大森整, 上原嘉宏, 片平和俊, 林偉民, 水谷正義, 小茂鳥潤, 鏡面研削における表面改質加工, 2014年度精密工学会秋季大会シンポジウム論文集, (2014.9.17, 鳥取大学) 22-25.
4. 升田祐樹, 岡田睦, 鈴木浩文, 森田晋也, 郭江, 山形豊, 林偉民, Niめっき金型の超精密切削—無電解Niめっきと電解Niめっき金型の切削特性の比較—, 2014年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2014.9.18, 鳥取大学) 57-58.
5. 真下春子, 林偉民, 無電解NiPめっき基板の鏡面研磨の基礎研究, 2014年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2014.9.18, 鳥取大学) 59-60.
6. 林偉民, 徐世傑, 鈴木浩文, 樋口俊郎, 低周波振動を援用した研磨法の研磨特性, 2014年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2014)講演論文集, (2014.9.11, 岩手大学) 217-218.
7. 真下春子, 林偉民, 無電解NiPめっき基板のポリシングの基礎研究, 2014年度日本機械学会関東支部第22回茨城講演会講演論文集, (2014.9.5, 茨城大学) 109-110.
8. 影山忠大, 真下春子, 林偉民: 低周波振動を援用した研磨法の基礎研究, 砥粒加工学会先進テクノフェア(ATF2014)卒業研究発表会論文集, (2014.3.6, 大田区) 55-56.
9. 長塩宏紀, 林偉民, 鈴木浩文, 小径回転

- 工具による非球面レンズ金型の研磨法の研究, 砥粒加工学会先進テクノフェア(ATF2014)卒業研究発表会論文集, (2014.3.6, 大田区) 57-58.
10. 林偉民, 自転/公転型研磨(RRP)法の研磨特性の確認, 2013年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2013.9.12, 関西大学) 527-528.
 11. 林偉民, 鈴木浩文, 回転工具による非球面金型研磨の特性, 2013年度日本機械学会関東支部茨城講演会講演論文集, (2013.9.6, 茨城大学) 35-36.
 12. 真下春子, 林偉民, 森田晋也, 山形豊, 無電解NiPめっき基板の鏡面研磨の研究, 2013年度日本機械学会関東支部茨城講演会講演論文集, (2013.9.6, 茨城大学) 37-38.
 13. 林偉民, 鈴木浩文, 小径回転工具による非球面金型研磨の基礎検討, 2013年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2013)講演論文集, (2013.8.27, 日本大学) 217-218.
 14. W. Lin, Study on the polishing characteristics of rotation & revolution type polishing method, The 4th International Conference on Nanomanufacturing (nanoMan2014), 8-10, Jul, Bremen, Germany (2014.7.9) CDROM.
 15. W. Lin, S. K. Chee, H. Suzuki and T. Higuchi, Polishing Characteristics of a Low Frequency Vibration Assisted Polishing Method, The proceedings of 16th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2013), Hangzhou, China, Sep. 23-26, (2013.9.24).

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・教授
研究者番号: 60321840

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし