

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 7 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560125

研究課題名（和文） 超音波 2 軸振動援用マイクロ研磨の研究

研究課題名（英文） Study on Ultrasonic 2-axis Vibration Assisted Polishing

研究代表者

鈴木 浩文（SUZUKI HIROFUMI）

中部大学・工学部・教授

研究者番号：20282098

研究成果の概要（和文）：

近年、デジタルカメラ、ブルーレーザ DVD のピックアップシステムにおいてマイクロガラスレンズが増大しており、超硬合金製マイクロ非球面金型によるガラス成形により量産されている。これらの金型は研削加工後に遊離砥粒を用いた研磨加工で仕上げる必要があり、さらに最近では傾斜角の厳しい形状が要求され、形状精度や表面粗さの向上も要求されている。これらを超精密に研磨するため、圧電素子を用いた超音波 2 軸振動マイクロ研磨システムを開発し、マイクロ非球面金型の仕上げ加工実験を行い、 $0.7\mu\text{mP-V}$ の形状精度と 8nmRz の表面粗さが得られることが確認され、その有効性が明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：

Micro glass lenses for digital cameras and blue laser DVD pick-up devices are generally molded by using micro aspheric ceramic molds made of tungsten carbides. These molds are finished by micro polishing using loose abrasives after grinding. Improvement to the accuracy of the molds is necessary, and high numerical aperture (NA) optics with steep angles are required. In order to finish the molds of high NA, an ultrasonic two-axis vibration assisted polishing machine with piezo-electric actuators was proposed and developed. Some micro aspheric molds made of binderless tungsten carbide were polished, and surface roughness of 8 nm Rz was obtained.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：生産工学・加工学

キーワード：超音波研磨，砥粒加工，マイクロ非球面金型，超音波 2 軸振動，表面粗さ，形状精度，振動解析，圧電素子

1. 研究開始当初の背景

近年、デジタルカメラ等のデジタルデバイス、体内検査用のマイクロカプセル等の医療デバイス、ブルーレーザなどのDVDデバイスにおいてマイクロ非球面レンズの微小化、高精度化のニーズが急激に増大している。

これまで本提案者らはマイクロ非球面の超精密研削・切削加工システムを開発し、マイクロデバイス用ガラスレンズを成形するためのセラミックス製成形型の精密加工への適用を行ってきた。提案者はマイクロ斜軸研削方法および装置を開発し、光通信や光ピックアップ用マイクロレンズ成形型を超精密に研削加工することができた。その結果、世界最小クラスのマイクロ非球面形状の超硬合金型の精密加工を、ダイヤモンド砥石による研削加工法により実現した。0.05~0.1 μ mP-Vの形状精度と、10~30nmRyの表面粗さが得た。

しかし、最近ブルーレーザ(短波長レーザ)用レンズに代表されるように、高精度化が要求されるようになった。さらにデジタルカメラ等のデジタルデバイス、体内検査用のマイクロカプセル等の医療デバイス用のレンズ等の様に更に微小のレンズ加工技術が必要となっている。このためには、従来の超精密研削加工や切削加工ではもはや性能的に限界が生じており、切削・研削加工の後に遊離砥粒を用いた研磨加工を施し、表面粗さを向上させ、あるいは形状精度をさらに改善する要求が生じている。一般の回転研磨法は従来から有るがマイクロ研磨は全く適応サイズが異なり不可能である。一方、東北大学や慶応大学では電気粘性流体を用いた優れたマイクロ研磨法の提案および開発が行われているが、金型材質が限定されることや、加工能率の点でまだ課題が残る。

また、提案者も超音波1軸振動を付加しながら遊離砥粒の作用でマイクロ研磨する手法を提案し、表面粗さの向上の可能性を示すことが出来た。しかしながら、振動方向が1方向であるために、10nm程度の微小な砥粒引掻き痕(スクラッチ)が残存し更なる改善が必要であることが明らかとなった。そこで、本提案では超音波2軸振動援用研磨法と、その piezo素子の複合振動メカニズムの提案を行い、その超音波2軸振動研磨における研磨メカニズム、現象を解明すると共に、その最適化を行い、上記のような微小なマイクロ光学部品の微小化、超精密化を行うものである。

2. 研究の目的

デジタルカメラ等のデジタルデバイスにおいて、マイクロ非球面レンズの微小化、高精度化のニーズが増大している。本研究ではその成形金型を更に超精密加工するため、超音波2軸振動援用研磨法と、その piezo素子の複合振動メカニズムの提案を行い、その超音波2軸振動研磨における研磨メカニズム、現象を解明し、その最適化を行い、マイクロ光学部品の微小化、超精密化を行うことを目的とする。

そのため、(1)超音波振動解析により超音波2軸振動発生装置の構造、最適な振動子の構造解析と試作、(2)CNC5軸(X, Y, Z, B, C)制御の滞留時間制御研磨装置・システムの構築・試作、(3)マイクロ非球面金型の形状修正手法と研磨条件を検討、(4)超音波振動周波数、振幅、研磨工具の圧力などが、研磨効率、表面粗さに与える影響の実験的解析を行い、微小なマイクロ光学部品の微小化、超精密化を実現するための研磨システムと技術の確立を行った。

3. 研究の方法

(1)振動解析による超音波円2軸振動研磨ヘッドおよび研磨ツール形状の最適化

超音波1軸振動研磨による超精密マイクロ研磨の可能性は実証されているが、加工面に対して2軸振動させる事が理想的である。そこで、有限要素解析ソフトANSYSを用いて超音波振動素子と工具形状の振動解析を行い、それらの形状の最適化を行い、その開発・試作を行った。

(本研磨ヘッドの基本的な仕様)

- ・工具の2軸振動周波数：20-25kHz
- ・振動工具の振幅(X,Y方向)：10-20 μ m

本機構の特徴は、円盤状素子により発生した「軸方向の振動」と、対の半円盤状素子(異相差：180度)により発生した「たわみ振動」を複合させ、マイクロ工具が加工面に対して平行な2軸振動することが特徴である。微細ダイヤモンド砥粒を供給しながら一定圧力を付加し、研磨加工の最小単位となる単一加工痕を得た。マイクロ工具の振動方向が加工面に対して平行な2軸振動であるため、砥粒による引掻痕の方向が加工面に対してランダムな方向になり、光学面として優れた加工面が得られる。Zygoレーザ干渉計システムにより加工面の表面粗さを評価した。

(2)研磨装置の試作

5軸制御の研磨装置(同時4軸制御)

(既存のNC駆動装置)に開発した超音波2軸振動研磨装置を搭載し、研磨システムの構築を行う。X,Z,Bの同時3軸制御(Y軸は工具位置調整時にのみ使用、C軸は一定速度回転)を行った。

(研磨システムの基本的な仕様)

- ・X軸：ストローク/100mm, Y軸：ストローク/100mm, Z軸：ストローク/50mm, 位置決め精度/0.1 μ m,
- ・B軸：ストローク/180 $^{\circ}$, 位置決め精度/0.01 $^{\circ}$

(3)超音波円振動安定化システムの検討

開発された超音波2軸振動装置だけでは、

振幅が温度上昇などの影響で長時間の安定は困難である。そこで、2軸振動ピエゾ素子の各振幅を計測し補償する回路を作製し付加した。

(4)超音波円振動援用研磨法におけるマイクロ砥粒粒子の挙動、加工現象の実験的解明、研磨条件の最適化

本提案の研磨法に関して実際に研磨を行う上で、表面粗さを向上させるには、超音波2軸振動を付加した場合におけるダイヤモンド粒子の挙動の解明が重要である。そこで、工作物に透明なガラス板を用い、既設のマイクロスコープ(キーエンス製)を研磨工具の反対側に設置し、各種超音波の条件で砥粒の微視的挙動を観察し、最もランダムな挙動を示す条件を見つけ、加工条件の最適化を図った。市販の半導体研磨用の発泡ポリウレタン製パッドでは表面粗さが悪く、加工面の精度も十分でなく、軟質ポリウレタン樹脂(硬度50, 70, 90)を加工して表面粗さの改善を図る。工具の表面粗さ、研磨荷重、振動数、振幅などを変化させて最適化した。さらに、その研磨条件において、加工時間や研磨圧力に対する研磨量の変化を確認する。また、形状修正する上で単一加工痕の形状は重要であり、形状修正に不利なW型とならず、V型となる研磨条件を選択した。

(5)超音波円振動における工具の振動形状を変化させた場合の表面粗さへの影響に関する検証

前年度に完成した超音波2軸振動装置において、2軸振動のX方向とY方向の振動の位相を維持しながら、振幅を2方向に変化させることにより、振動の軌跡を円形状、楕円形状、ランダムな軌跡にすることが出来た。振動の軌跡による工作物の表面粗さへの影響について検証する。研削加工した平面形状の超硬合金製工作物を用いて、振動形状による表面粗

さの変化をシミュレーションし、実験結果と比較し、最適な振動モードを求めた。

(6) 超音波 2 軸振動援用研磨法によるマイクロ非球面の研磨検証

基礎研磨実験に基づいて、実際にマイクロ非球面金型を用いた加工精度の検証実験を行った。工作物としては、超精密研削装置 ULG100D(SH3) とマイクロダイヤモンドホイールを用いて、形状精度 $0.2 \mu\text{mP-V}$ 、表面粗さ 20nmRz 程度に仕上げ、形状精度の向上と表面粗さの向上を確認した。工具には、実験 5 で得られた最適な工具材質を用い、遊離砥粒として $0.5 \mu\text{m}$ 程度のダイヤモンドペーストを希釈して用いた。非球面形状の形状精度の評価は Form Talysurf (英国テラホブソン社製、既設) により計測し、その測定データを PC に取り込んで、目標形状との差を計算した。形状評価法は最小二乗法を用いたソフトウェアの開発も行なうことにより実施した。表面粗さは非接触表面粗さ計 (ZYGO 社製) を用いて行った。

4. 研究成果

以上のように研削後のマイクロ非球面金型を超精密に仕上げるため、圧電素子を用いた超音波 2 軸振動援用研磨法を提案し、開発した。さらに、振動モードを解析し最適化して研磨の最適化を行った。その結果以下のことが明らかとなった。

(1) 微小な工作物に軟質の工具を一定の微小圧力で接触させ、微小な砥粒をかけながら超音波振動させるマイクロ加工法であり、特に圧電素子を複合させることにより、加工面に対して 2 軸振動させることを特徴とする研磨法である。これにより、従来の超音波 1 軸振動研磨法に比べ、超

硬合金製の工作物に対して、研磨痕 (スクラッチ) などが無く、従来に無い 5nmRz 程度の表面粗さがの仕上げ加工が可能となった。

(2) また、工具は回転しない振動タイプであるため、研磨圧力の制御の精度が向上し、しいては工作物の形状精度の向上が期待できる。具体的には、 $0.05 \mu\text{mP-V}$ の形状精度が実現できた。

(3) さらに、工具径が小さいにも関わらず、超音波という高速振動運動であるため、高能率な研磨加工が可能となった。

以上のような結果が得られ、デジタルデバイス、電子デバイス用のマイクロ非球面レンズの微小化、高精度化が可能になった。

5. 主な発表論文等

[論文] (計 7 件)

① Guo, H. Suzuki, T. Higuchi: Development of micro polishing system using a magnetostrictive vibrating polisher, Precision Engineering, 37, 1 (2013) pp.81-87. 査読有.

② S. K. Chee, H. Suzuki, J. Uehara, T. Yano, T. Higuchi, W. Lin, A low contact force polishing system for micro molds that utilizes 2-dimensional low frequency vibrations (2DLFV) with piezoelectric actuators (PZT) and a mechanical transformer mechanism, International Journal of Automation Technology, 7, 1 (2013) pp.71-82.

③ S. K. Chee, H. Suzuki, J. Uehara, T. Yano, T. Higuchi: Preliminary Studies for Precision Polishing of Micro Structured Mold by Using Three-dimensional Low

Frequency Vibration Utilizing Piezoelectric Actuator Incorporated with Mechanical Amplitude Magnified Mechanism, Advance in Abrasive Technology, 565, 1, (2012) pp.231-236. 査読有.

④ J. Guo, H. Suzuki, M. Hara, S. Morita, Y. Yamagata, T. Higuchi: Development of pressure control system for ultra-precision finishing, Proceedings of 12th euspen international Conference, Stockholm, Sweden (2012) pp.535-538. 査読無.

⑤ J. GUO, H. Suzuki and T. Higuchi: Finishing of Micro Aspheric Molds by Vibration Assisted Polishing Using Magnetostrictive Material, Proceedings of 11th euspen international Conference, Como, Italy (2011)pp.275-278. 査読無.

⑥ S. K. Chee, H. Suzuki, M. Okada, T. Yano, T. Higuchi, and W. Lin: Precision Polishing of Micro Mold by using Piezoelectric Actuator Incorporated with Mechanical Amplitude Magnified Mechanism, Advanced Materials Research, 325, 1 (2011)pp.470-475. 査読有.

⑦ H. Suzuki, S. Hamada, T. Okino, M. Kondo, Y. Yamagata, T. Higuchi, Ultraprecision finishing of micro-aspheric surface by ultrasonic two-axis vibration assisted polishing, Annals of the CIRP, 59, 1(2010) pp.347-350. 査読有.

[雑誌論文] (計3件)

① 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もつ金型の研磨法の研究, 型技術, 27, 7 (2012) pp.118-119. 査読無.

② 鈴木浩文, 岡田 睦, 徐 世傑, 矢野 健,

樋口俊郎: 圧電素子を用いた振動研磨による微細形状の超精密精密研磨, 型技術, 26, 7 (2011) pp.42-43. 査読無.

③ 岡田睦, 鈴木浩文, 三浦勝弘, 松岡 伸夫: レーザプローブ走査方式の超精密測定の研究—青色レーザ利用による高精度化—, 型技術, 26, 7 (2011) pp.134-135. 査読無.

[学会発表] (計7件)

① 郭 江, 鈴木浩文, 森田晋也, 山形 豊, 樋口俊郎: Polishing Experiments of Micro Aspheric Mold Using Vibration Assisted Polishing Machine, 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2012) p.501-502.

② J. GUO, H. Suzuki, K. Yoshida, T. Higuchi: Development of Micro Polishing System by Using Magnetostriction Vibrator, 2011 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(2011) pp.861-862.

③ 小林直貴, 久保田享, 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講演論文集 (2011)pp. 863-864.

④ S. K. Chee, H. Suzuki, M. Okada, K. Yoshida, W. Lin, T. Yano, T. Higuchi: Study on precision polishing of micro structured mold —Development of micro polishing system using piezoelectric actuator —incorporated with mechanical transformer —, 2011 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(2011)pp. 865-866.

⑤ S. K. Chee, H. Suzuki, M. Okada, K. Yoshida, W. Lin, T. Yano, T. Higuchi: Preliminary studies on precision polishing of micro structured mold —

Development of micro polishing system using piezoelectric actuator incorporated with mechanical transformer -, 2011 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集 (2011) pp. 115-116.

⑥ 郭 江, 鈴木浩文, 樋口俊郎: マイクロ非球面研磨用磁歪振動研磨装置の開発, 2011 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集 (2011) pp. 117-118.

⑧ 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講演論文集 (2011) pp. 123-124.

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称: 研磨装置

発明者: 徐 世傑, 鈴木浩文, 林 偉民, 樋口俊郎, 吉田和史, 矢野 健

権利者: 同上

種類: 特開公 2012121130

出願年月日: 2012 年 6 月 28 日

国内外の別: 国内

名称: 変位拡大機構及び研磨装置

発明者: 徐 世傑, 矢野 健, 鈴木浩文, 林 偉民, 樋口俊郎, 吉田和史

権利者: 同上

種類: 特開公 2012175746

出願年月日: 2012 年 9 月 10 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等:

<http://www.chubu.ac.jp/about/faculty/profile/81055a74934afd47b755fc8aca81a2b9e76024dc.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 浩文 (SUZUKI HIROFUMI)

中部大学・工学部・教授

研究者番号: 20282098

(2) 研究分担者: 無

(3) 連携研究者: 無