

平成22年4月20日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19360055

研究課題名（和文） ガラス製超薄型フレネルレンズの高精度プレス成形

研究課題名（英文） High-Accuracy Glass Molding Press for Ultrathin Fresnel Lenses

研究代表者

閻 紀旺（YAN JIWANG）

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40323042

研究成果の概要（和文）：近年、光学系の薄型・軽量化のために、ガラス製超薄型フレネルレンズが要求されている。本研究では、高温ガラスプレスに使用可能な成形金型を開発し、それを用いて超薄型ガラスフレネルレンズの高精度成形を試みた。また、成形時のガラス材料の流動メカニズムと応力・ひずみ分布およびガラス・離型膜・金型間の界面における原子拡散現象について実験と解析の両面から研究を行い、金型寿命を改善するためのプレス成形条件の最適化を行った。

研究成果の概要（英文）：Recently, the needs for glass Fresnel lenses is increasing for the purpose of miniaturization of optical systems. In this study, molds for high-temperature glass molding were developed and molding experiments for ultra-thin Fresnel lenses were performed. The glass flowing mechanism, stress/strain distribution, and the atomic diffusion phenomena at the interface among the glass, the release agent coating and the mold were investigated by experiments and numerical simulation. Process optimization was performed for improving the service life of the molds.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,300,000	2,490,000	10,790,000
2008年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2009年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	15,100,000	4,530,000	19,630,000

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：光学ガラス、フレネルレンズ、プレス成形、金型、超精密切削、微細形状転写

## 1. 研究開始当初の背景

近年、デジタルカメラや携帯電話カメラ、CD・DVDのピックアップ光学系、青色レーザ高密度光ディスクシステムおよび車載用ナイトビジョンシステムなどでは、高画素

化・小型薄型化・高信頼性を実現するために、レンズ材料が樹脂からガラスへと移行しつつある。従来のガラスレンズは主に球面レンズである。球面レンズは簡単な機械で加工が可能である。しかし、球面レンズには収差と

いう致命的な欠点があり、通常、各種の球面レンズを組合せて補正している。収差を補正するために非球面レンズの導入が有効な手段であり、現在非球面加工技術の開発は急速に進んでいる。

一方、非球面レンズよりもさらなる集光効率の向上および光学系の超薄型・軽量化を目的として、フレネルレンズが要求されてきている。フレネルレンズとは、球面あるいは非球面レンズの表面を同心円状に細かい幅に分割し、その傾斜角だけを平面上に微小プリズムの配列として置き換えたものである。フレネルレンズを用いることで、光の透過損失と球面収差が同時に低減でき、光学装置の飛躍的な薄型軽量化・高性能化が期待できる。

これまでに、樹脂製のフレネルレンズが開発されている。しかしガラスへのフレネル形状の加工は、切削や研削などの除去加工法では困難とされている。最近、マルチマスクを用いたエッチングや集束イオンビーム加工などによるガラスの加工も報告されているが、加工能率や加工可能な寸法・材質にも制限がある。そこで、除去加工の代わりに、高温プレス成形法を用いたガラスフレネルレンズの製作が考えられる。

プレス成形加工では、金型の製作技術が最も重要である。これまで、非球面ガラスレンズの成形には超合金の金型が使用されている。しかし超合金は高硬度のため、切削によるフレネル形状の転写加工が不可能とされている。ところで、通常、樹脂材料のプレス成形には鋼鉄材料に無電解ニッケルめっき（以下 Ni-P と記す）を施した金型が使用されている。Ni-P は比較的低硬度で転写性が優れているため、切削加工が比較的容易である。しかし、通常の Ni-P 金型は主に低温条件で使用されており、より高温状態（400℃以上）のガラス成形において Ni の結晶化に伴う体積収縮により金型表面の Ni-P めっき層が割れや表面粗さ悪化の問題があった。

## 2. 研究の目的

本研究では、ガラスの成形温度（400℃以上）でも使用可能な Ni-P 金型を開発し、それを用いたガラスフレネルレンズの高精度プレス成形を実現することを目的とする。また、成形時のガラス材料の流動メカニズムと応力・ひずみ分布およびガラス・離型膜・金型間の界面における原子拡散現象について実験と解析の両面から研究を行い、金型寿命を改善するためのプレス成形条件の最適化を行う。

## 3. 研究の方法

(1) 金型製作実験：金型基材には比較的高温強度に優れる熱間工具鋼を用いた。基材を調質後、表面に無電解 Ni-P めっきを施した。

めっきを行うときに、P の含有率および結晶性などを制御することで、通常の樹脂レンズ成形用金型より硬さを高く調整した。次に、熱による金型の変形を防ぐ目的で成形温度よりも高い温度で金型を加熱した。そして、めっき層を超精密加工で切削加工を行い、最終形状に仕上げた。最後に、仕上げた Ni-P めっき面に中間層 Ni と離型膜 Ir-40wt%Pt をスパッタリングした。

(2) ガラスプレス成形実験：ガラス成形機（東芝機械製 GMP-211）を用いて低融点ガラス K-PG375（住田光学ガラス製）および高融点ガラス L-BAL42（オハラ製）を成形した。装置は石英筒に覆われた成形室、その円周外部の赤外線ランプによる加熱ユニット部、および金型駆動部から構成されている。成形室内に上下金型が配され、下金型は NC 制御により上下運動する。また、下の金型駆動軸に設けられたロードセルの検出荷重をフィードバックすることでプレス力の制御が可能となっている。成形室内の空気は窒素ガスで置換され、金型の酸化を防止する。また、成形後の金型および成形品の冷却にも流量制御された窒素ガスが使用される。なお、石英筒の内側を真空に引くことにより成形室内を真空に保ち、金型の酸化および成形品へのガス溜りを防ぐこともできる。実験では、ガラスの成型温度まで赤外線ランプにより金型を加熱し、金型とガラスが同じ温度になるまで保持した後に上下の金型でプレス成形を行う。冷却過程では、ガラス転移点まではプレスしながら徐冷し、その後すばやく冷却して型離しを行った。

(3) 成形過程の有限要素法解析：有限要素法ソフト MSC-MARK を用いて、すべての成形過程すなわち加熱、プレス、アニーリング、冷却の各段階におけるガラスと金型の熱伝導、熱変形、粘弾性変形、応力・ひずみ変化を解析し、シミュレーションを行った。この中で特に重要となるプレス段階におけるガラス粘弾性変形とアニーリング段階における応力緩和を高精度に解析するために、一般化マックスウェルモデルに基づいたガラス粘弾性モデルを提案した。そして、クリープと応力緩和係数を同定するため、ガラス成形機を用いて円柱状ガラス硝材を圧縮する実験方法を提案した。これにより、専用測定装置を必要とせず、ガラスの粘弾性を精密に測定することが可能となっている。以上により、GMP プロセスにおける熱伝導・粘弾性変形の連成解析を可能にしている。さらに、金型の形状補正量も計算で予測できるようにし、微細構造の充填率が 100%になる最適成形条件を見出している。そして解析で得られた最適成形条件に基づき、表面微細形状を有する NiP 製金型を利用して微細溝列、並びに微細ピラミッドアレイの転写へも適用した。

(4) 界面現象の研究：高温成形実験において Ni-P めっきを施した金型表面に曇り現象およびガラスの融着現象が発生した。これは、高温で Ni や P の離型膜への拡散速度が比較的速くなり、金型表面の劣化を引き起こした結果と思われる。そこで、高温条件における金型表面の曇り現象のメカニズムを検討するために、平面金型を製作した。金型を大気圧の窒素雰囲気中で加熱・保持した。加熱前後の金型の表面粗さを表面粗さ測定機で測定した。さらに、原子間力顕微鏡 (SII) および表面粗さ測定機 (Zygo) で表面形状を測定した。めっき層と離型膜の構成元素による相互拡散を調べるために、2 次イオン質量分析、光電子分光分析、透過型電子顕微鏡、エネルギー分散型 X 線マイクロアナライザーによる各種分析を行った。また、離型膜および中間層の断面観察のために集束イオンビームで断面を切り出し、走査型イオン顕微鏡で断面観察を行った。

#### 4. 研究成果

(1) レンズの成形精度：単結晶ダイヤモンドバイトを用いて NiP 金型表面に同心円状の微細溝を加工し、それを金型として K-PG375 ガラスのプレス成形を行った。一例として、図 1 に金型と成形したレンズの断面形状を示す。微細溝形状の転写性が良好であり、成型精度が数十 nm であることが分かる。したがって、NiP 金型を用いることで従来は困難とされていたガラス製回折光学素子やフレネルレンズの高精度成形が可能である。なお、400°C 前後の比較的低温の条件で金型寿命が 1000 ショット以上であることを確認した。

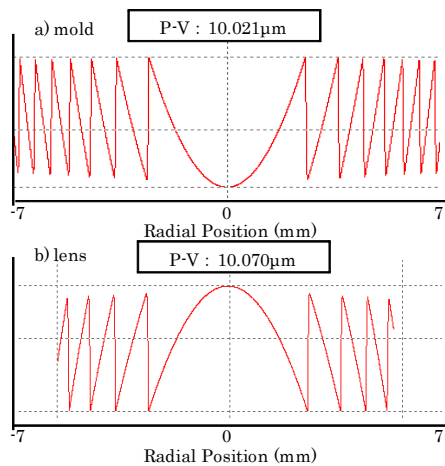


図 1 金型とレンズの断面プロファイル

(2) 成形プロセスの有限要素法解析：有限要素法を用いて加熱、プレス、アニーリング、冷却の各段階におけるガラス粘弾性流動と応力・ひずみ変化を解析し、成形プロセスの

完全可視化を可能にした。図 2 は、微細溝成形時のガラス内部の残留応力およびひずみ分布のシミュレーション結果の一例である。

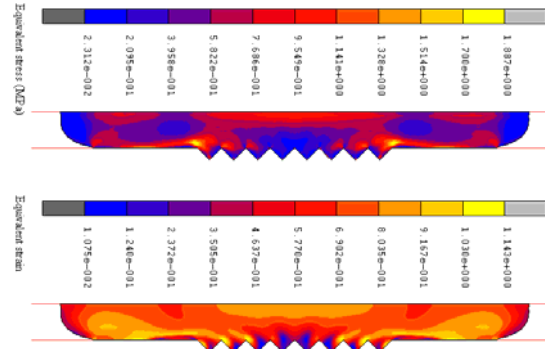


図 2 微細溝成形にける応力・ひずみ分布

(3) 界面現象の解明：成形温度が高い場合 (570°C)、金型の表面曇り現象が発生すると同時に、金型表面へのガラスの融着が観察された。曇り現象を発生した金型では、Ni-P めっき層の Ni が金型の表層まで拡散しており、また離型膜の Pt, Ir も加熱前よりも内部へ拡散していることが分かった (図 3)。そこで本研究では、原子拡散を防ぐための金型めっき層と離型膜材質の最適化設計を行った (成果は未公表)。その結果、ガラスレンズの成形温度に相当する 400°C から 600°C の範囲で拡散係数比率が  $4.8 \times 10^5 \sim 2.4 \times 10^4$  となる耐熱性金型を開発した。これにより、拡散速度と拡散距離を 700 分の一から 150 分の一に低減することができた。これは、フレネルレンズのみならず、非球面ガラス光学素子などの高温プレス成形における金型寿命の向上にも貢献できる有意義な成果であると考えられる。

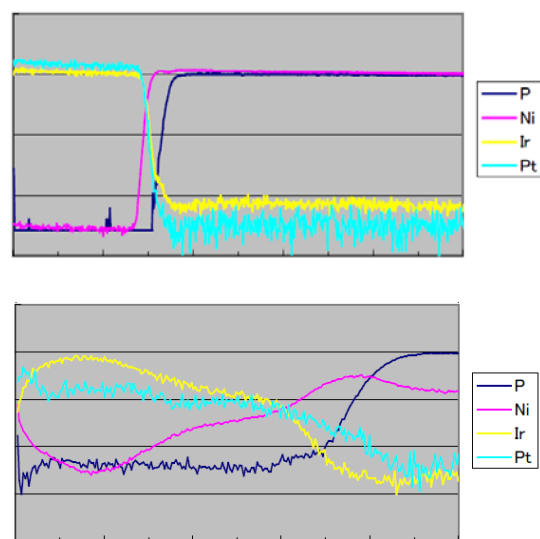


図 3 加熱前後の金型表層元素分析結果

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 7 件)

1. T. Zhou, J. Yan, N. Yoshihara, T. Kuriyagawa: Study on Nonisothermal Glass Molding Press for Aspherical Lens, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, (2010) (in press). (査読有)
2. J. Yan, T. Oowada, T. Zhou, and T. Kuriyagawa: Precision machining of microstructures on electroless-plated NiP surface for molding glass components, Journal of Materials Processing Technology, 209, 10 (2009) 4802-4808. (査読有)
3. T. Zhou, J. Yan, J. Masuda, and T. Kuriyagawa: Investigation on the viscoelasticity of optical glass in ultraprecision lens molding process, Journal of Materials Processing Technology, 209, 9 (2009) 4484-4489. (査読有)
4. J. Masuda, J. Yan, T. Tashiro, Y. Fukase, T. Zhou and T. Kuriyagawa: Microstructural and Topographical Changes of Ni-P Plated Molds in Glass Lens Pressing, International Journal of Surface Science and Engineering, 3, 1-2 (2009) 86-102. (査読有)
5. J. Yan, T. Zhou, N. Yoshihara, and T. Kuriyagawa: Shape transferability and microscopic deformation of molding dies in aspherical glass lens molding press, Journal of Manufacturing Technology Research, 1, 1-2 (2009) 85-102. (査読有)
6. J. Yan, T. Zhou, J. Masuda, and T. Kuriyagawa: Modeling high-temperature glass molding process by coupling heat transfer and viscous deformation analysis, Precision Engineering, 33, 2 (2009) 150-159. (査読有)
7. 増田 淳, 閻 紀旺, 厨川常元: NiPめっきを施した鉄鋼金型のガラスレンズ成形への応用, 砥粒加工学会誌, 52, 8 (2008),444-448. (査読有)

[学会発表] (計 8 件)

1. T. Zhou, J. Yan, N. Yoshihara, and T. Kuriyagawa: Study on Nonisothermal Glass Molding Press for Aspherical Lens, the 5th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), Dec. 2-4, 2009, Osaka, Japan,.
2. J. Yan: Molding Glass Components (Keynote), International Molded Optics Conference (iMOC2009), 20 Nov., 2009, Bremen, Germany.
3. T. Zhou, J. Yan, J. Masuda, T. Owada, and T.

Kuriyagawa: Numerical and Experimental Investigation on the Transferability of Ultraprecision Glass Molding Press for Microgrooves, the 3rd International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2009), Nov.11-13, 2009, Kitakyushu, Japan.

4. T. Zhou, J. Yan, N. Yoshihara, T. Kuriyagawa, and J. Masuda: Investigation on the Transferability of Precision Molding Process for Aspherical Glass Lenses, the 8th International Conference on Frontiers of Design and Manufacturing, September 23~26, 2008, Tianjin, China.
5. T. Zhou, J. Yan, J. Masuda, T. Kuriyagawa: Investigation on the viscoelasticity of optical glass in ultraprecision lens molding process, the 8th Asia-Pacific Conference on Materials Processing (APCMP2008), June 15-20, 2008, Guilin, China.
6. J. Yan, T. Oowada, T. Zhou, T. Kuriyagawa: Precision machining of microstructures on electroless-plated NiP surface for molding glass components, the 8th Asia-Pacific Conference on Materials Processing (APCMP2008), June 15-20, 2008, Guilin, China.
7. T. Zhou, J. Yan, T. Kuriyagawa: Evaluating the Viscoelastic Properties of Glass above Transition Temperature for Numerical Modeling of Lens Molding Process, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2007: Optoelectronic System Design, Manufacturing, and Testing, September 9-12, 2007, Beijing, China.
8. J. Masuda, J. Yan, T. Kuriyagawa: Application of the NiP-Plated Steel Molds to Glass Lens Molding, the 10th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2007), 25-28 September 2007, Dearborn, USA.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

閻 紀旺 (YAN JIWANG)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40323042

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：