

機関番号：13601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560071

研究課題名（和文）超精密ガラスデバイスのナノインプリント成形

研究課題名（英文）Thermal nanoimprinting of ultraprecision glass-optical devices

研究代表者

荒井 政大（ARAI MASAHIRO）

信州大学・工学部・教授

研究者番号：30260532

研究成果の概要（和文）：ガラス製マイクロ・ナノ光学デバイスの熱インプリントに関する成形試験および有限要素シミュレーションを実施した。D263 ガラスの熱粘弾性特性は、圧縮クリープ試験により求めた。成形試験には、ライン&スペースおよびマイクロレンズアレイ形状を付与した金型を用い、ガラスへの転写性が最適となる成形温度、成形圧力について調査した。また、有限要素シミュレーションを実施し、成形試験結果と比較することにより、断面形状および転写高さに関して、ほぼ同様の結果が再現可能であることを確認した。さらに一軸引張試験を実施し、ガラスの強度を温度とひずみ速度との関係として求めた。

研究成果の概要（英文）：Some experimental testing and numerical simulations by FEM for thermal imprinting of glass-optical devices were investigated. Thermo-viscoelastic property of the glass material was estimated using compression creep tests. In this study, D263 was used as glass material. Glass thermal imprint tests were carried out with amorphous carbon dies that were given to line & space or micro-lens array pattern machined by focused ion beam (FIB). The optimum condition of imprinting temperature which given appropriate transcription profile of the glass was investigated. Moreover, numerical simulations for thermal imprinting of the glass were carried out by finite element method. Comparing experimental results with numerical ones, the transcription of height of groove or micro-lens obtained by experimental tests approximately agreed with numerical values. In addition, the relationship between tensile strength, temperature and strain rate was obtained by the uniaxial tensile test.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：（分科）機械工学（細目）機械材料・材料力学

キーワード：熱インプリント成形，ガラスデバイス，有限要素法，熱粘弾性，クリープ試験，
数値シミュレーション，引張強度

1. 研究開始当初の背景

デジタルカメラや携帯電話，さらには医療機器や分析機器など様々な分野において，光学デバイスが用いられている。ガラス製光学デバイスは，プラスチック製に比べて高価ながら，優れた光学特性および熱的特性を有し，さらには厳環境下での使用が可能であることから，高性能・高機能デバイスにおいて需要

はますます拡大している状況である。

光学分野においては，レンズ性能のさらなる高性能化，小型化（薄型化）の要求から，様々な光学機器に非球面ガラスレンズが用いられている。また，回折格子，マイクロレンズアレイや反射防止構造に代表されるように，ガラス表面にマイクロ・ナノスケールの微細構造を付与し，新たな光学特性の発現を実現

させる製品の開発が急速に進んでいる。

球面ガラスレンズは凹面または凸面を有する球面形状の砥石を用いて研磨することで、大量生産が可能であったが、非球面レンズの場合はその製造自体が極めて難しく、製造コストも高いといった難点がある。また、ガラス表面へのマイクロ・ナノパターンニングには半導体プロセスが一般的に用いられるが、大量生産は不可能である。

この問題に対し、ここ10年来の技術として、熱インプリント成形法（ガラスモールドプレス成形法）が開発され、注目を集めるようになった。熱インプリント成形は、金型を用いてガラスをプレス成形する加工法であり、ガラスが比較的軟らかく、粘性的挙動が顕著となる温度域（ガラス転移点より20～60K程度高い温度域）にて加工されるという点に特徴がある。また、従来の工法と比べて大量生産が可能であり、さらに加工パターンサイズに実質的に制限がないことなどの利点を有する。

しかしながら、ガラス転移温度近傍におけるガラスの変形挙動は温度による変化が非常に激しく、その力学的挙動を予測することは極めて難しいことが知られており、成形時間や成形温度、プレス圧力など、成形時における種々のパラメータを最適に選択することが困難な現状にある。また、成形中に生じるガラスの割れ、すなわち破損のクライテリオンを満足する成形条件を見出す必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、上記背景を受け有限要素解析を用いてガラスの熱ナノインプリント成形の最適成形条件を評価することを目的とする。

数値解析に先立ち、様々な温度環境下での一軸圧縮クリープ試験を実施し、ガラス材料の熱粘弾性特性の導出を行う。その後、得られた熱粘弾性特性を用い、ナノメートルオーダーのライン&スペースパターンおよびマイクロレンズアレイの成形に関する数値シミュレーションを実施し、実際の成形試験結果との比較を行う。

また、成形中に生じるガラスの破損予測を可能とするために、ガラスの強度特性を一軸引張試験により評価する。最終的に得られた実験データより、ガラスの引張強度を温度とひずみ速度との関係として求める。

3. 研究の方法

(1) ガラス材料の熱粘弾性特性

本研究では、ガラス材を線形熱粘弾性体として取り扱い、一軸圧縮クリープ試験を実施し、ガラスのクリープ関数を求めることにより各温度における緩和弾性係数を導出した。

ここで、線形熱粘弾性体には、時間-温度換算則が成り立つことが知られている。すなわち、各温度での緩和弾性係数を対数時間軸

上に平行移動させると、すべての緩和弾性係数を一本のマスターカーブにまとめることができる。ここで、基準温度の緩和弾性係数に対する対数時間軸の相対移動量をシフトファクターと呼ぶ。

本研究では、供試ガラスとして、硼珪酸ガラスの一種であるD263を用いクリープ試験を実施した。得られたクリープ関数より各温度での緩和せん断弾性係数を算出した後、マスターカーブをMaxwellモデルにより近似した。また、シフトファクターの近似には、Narayanaswamyの式を用いた。以上より得られたMaxwellモデルの諸係数および活性化エネルギーを用い、汎用有限要素法コードANSYS（サイバーネットシステム㈱）により数値シミュレーションを実施した。

(2) 熱インプリント成形試験

熱インプリント成形用金型として、アモルファスカーボンを用い、上型表面に対し、集束イオンビーム加工機により、ライン&スペース（L&S）およびマイクロレンズアレイ（MLA）パターンを付与した。L&Sは、溝幅723nm、深さ734nm、長さ10 μ m、ラインピッチ1000nmの9本の矩形溝形状とし、一方、MLA形状は、直径7.47 μ m、レンズ中心部深さ（sag量）0.84 μ mの9個のレンズを3 \times 3の正方配置とした。下型には未加工のGCを使用した。一方、供試ガラスには、前述のD263ガラスを用い、10mm \times 10mm \times 1.1mmに切り出した板材を試験片として用いた。

成形は、ホットエンボス装置（ASHP-0101, エンジニアリングシステム㈱製）を用い、成形雰囲気は真空中とした。今回の試験では、転写性に及ぼす成形温度の影響を詳細に調査するため、成形圧力は4MPaで一定とし、成形温度のみ変化させて試験を行った。L&Sの場合は、600～640 $^{\circ}$ C、MLAの場合は、580～620 $^{\circ}$ Cとした。なお、冷却工程において、強制冷却は行っておらず、上型の変位を固定した状態において自然冷却とした。

(3) ガラス材の一軸引張試験

電気炉を備えた万能引張試験機（㈱島津製作所製：AG-10TD）を用い、ガラスの一軸引張試験を実施した。ガラス試料には光学ガラスの一種であるBK-7を用いた。試験条件は、ひずみ速度：2, 28, 350 [μ /s]、試験温度：298, 573, 673, 773 [K]とした。

4. 研究成果

(1) L&Sパターン成形

L&Sパターンのインプリント成形に使用した金型および640 $^{\circ}$ C成形品のSEM写真を図1に示す。これより、金型形状が高精度にガラス表面に転写できていることが確認できる。

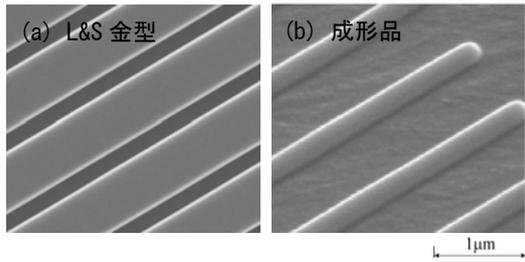


図1 L&S金型および成形品のSEM写真

次に、クリープ試験により得られた熱粘弾性特性を用いて、L&Sパターンの熱インプリント成形に関する有限要素解析を実施した。本研究にて使用したL&Sパターンの解析モデルを図1に示す。本モデルでは、ガラス下面の変位を固定とし、左側面の境界に対して対称境界条件を、また、右側面の境界に対しては、カップリングの境界条件を与えた。なお、成形温度を600~640°Cに変化させ、大変形を考慮した二次元解析を実施した。また、ガラス-金型間の摩擦係数を0~0.6まで変化させ、転写性に及ぼす摩擦の影響について検証し、実際に作用する摩擦係数を予測した。

摩擦係数を変化させて数値解析を行った際の各成形温度での転写高さを図2に示す。成形温度が高くなるにつれ摩擦係数による影響が支配的となる。これは、成形温度の上昇に伴い、ガラスの変形量が大きくなるため、ガラスと金型側面との接触面積が相対的に大きくなることに起因していると考えられる。また、摩擦係数0.6においては、実験値と解析値との差は2%以下と非常に小さいことが確認できる。このことから、実際の接触面での摩擦係数は、0.6程度であると推察される。

今回の成形試験において、成形温度640°Cの場合でも完全転写は実現していない。原因としては成形温度が低い、もしくは成形圧力が低いことが考えられるため、有限要素解析により摩擦係数0.6のもと、完全転写が実現する成形温度、成形圧力を調査した。その結果、660°C、7.5MPaにて、完全転写が可能であることを確認した。

(2) MLA パターン成形

MLA金型および620°C成形品のSEM写真を図4に示す。L&Sパターン同様、高精度に金型形状を転写できていることが確認できる。

MLAパターンの解析には、図5に示すような周期性を考慮した1/4三次元解析モデルを使用した。本解析モデルでは、ガラス下面の変位を固定として、レンズ形状を有する側面においては、対称境界条件を、また、他の側面においては周期境界条件を適用した。L&Sパターン成形解析の結果をもとに、ガラスと金型との摩擦係数を0, 0.6とし、接触大変形を考慮した有限要素解析を実施した。

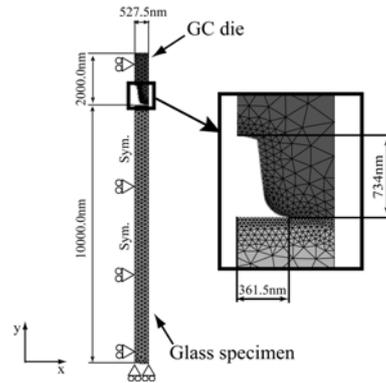


図2 L&Sパターンの解析モデル

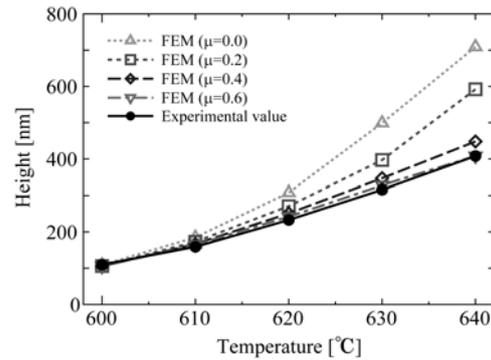


図3 L&Sパターンにおける成形温度と転写高さの関係

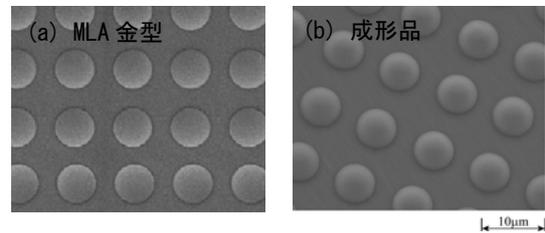


図4 MLA金型および成形品のSEM写真

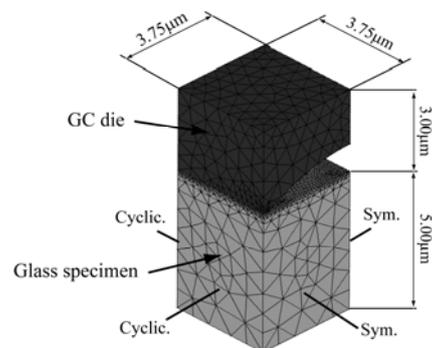


図5 MLAパターンの解析モデル

図6に成形温度580~620°Cにて、成形試験および有限要素解析より得られたレンズの転

写高さを示す。成形温度と転写高さの関係において、解析結果は実験結果を高精度に表現できていることが確認できる。また、成形温度610°C以上において、MLAはほぼ完全に転写していることが分かる。なお、前節のL&Sパターンとは異なり、MLAの場合には、摩擦係数の影響が極めて少ないことが確認できる。これは、成形中における金型／ガラス間の接触状態の差に起因しており、MLAの場合は、ガラスが金型とほぼ接触せずに変形が進行したためであると考えられる。

実験結果に対する解析精度を明らかにするため、完全転写が実現した成形温度620°Cのレンズ形状について、形状誤差を調査した。図5に実験値および解析値より得られた形状誤差（レンズ形状－金型形状）を示す。実験値では、レンズ中心部において20nm程度の誤差が見られるものの、中心から1μm以上離れた部分においては、実験値と解析値はほぼ一致しており、いずれも10nm程度と非常に小さい誤差であった。この結果より、本研究で実施した有限要素解析は実験値に対して、数nm程度の誤差しか生じておらず、非常に高精度であることが分かった。

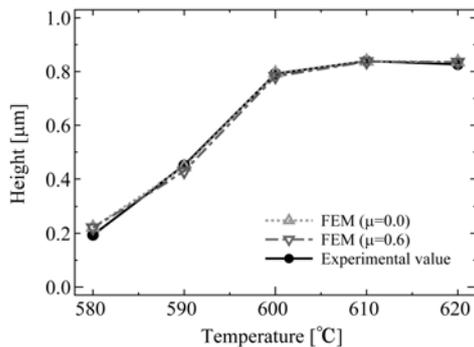


図6 MLAパターンにおける成形温度と転写高さの関係

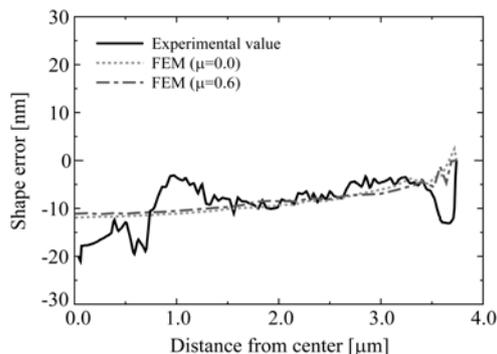


図7 金型形状に対するレンズ形状誤差（成形温度：620°C）

(3) 引張試験によるガラスの強度特性評価
引張試験により得られた荷重－変位線図

より、破断応力を算出した。得られた破断応力の平均値を表1に示す。破断応力は、試験温度の上昇に伴い低下し、また、ひずみ速度の増加に伴い増加した。以上の結果より、破断応力は、ひずみ速度依存性および温度依存性を示すことが確認された。

表1 BK-7ガラスの引張強度
(単位：[MPa])

	2 [μ/s]	28 [μ/s]	350 [μ/s]
298 [K]	40.6	56.7	72.9
573 [K]	36.5	40.0	54.1
673 [K]	35.7	39.1	52.5
773 [K]	32.0	34.8	43.2

次に、引張試験より得られた引張強度を温度とひずみ速度との関係として求めるために、活性化エネルギーにより表現される以下の式を適用した。

$$\dot{\epsilon} = \gamma \sigma^\beta \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \quad (1)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度 [μ/s]、 σ は破断応力 [MPa]、 R は気体定数 (8.31[J/mol·K])、 ΔH は活性化エネルギー [J/mol]、 T は絶対温度 [K]である。なお、 β および γ は材料定数である。

先にも述べた通り、ガラスは線形熱粘弾性であるため、時間－温度換算則が適用できる。そのため、表1の結果を用いてマスターラインおよびシフトファクターを導出することで、任意温度における引張強度とひずみ速度の関係は、次式で示すことが可能となる。

$$\ln \sigma = 0.0837 \left\{ \ln \dot{\epsilon}_T + \ln \alpha_{T_0}(T) \right\} + \frac{164.5}{T_0} + 3.19 \quad (2)$$

引張試験より得られた破断応力とひずみ速度、および絶対温度の関係を図8の三次元グラフに示す。また、式(2)を用いて近似された破断応力、ひずみ速度、および絶対温度の関係を図9に示す。両者を比較した結果、高温側（特に773K）での近似精度がやや低い結果となった。この原因としては、シフトファクターの近似精度に起因しているものと考えられる。しかしながら、全体的には破断応力分布の概形が精度良く近似できていることが確認できた。なお、今回の破断応力の近似誤差は、実験値に対して7.5%程度であった。以上の結果より、任意温度、任意ひずみ速度環境下での破断応力を、活性化エネルギーを用いた近似式により表現することの妥当性が確認された。

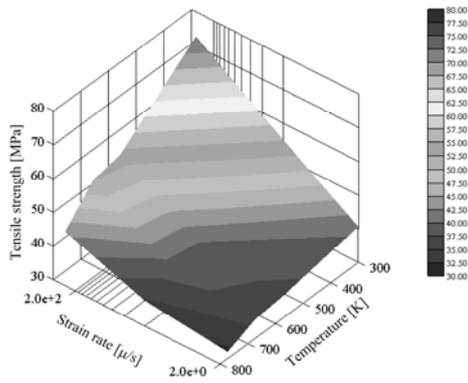


図8 強度，温度，ひずみ速度の関係

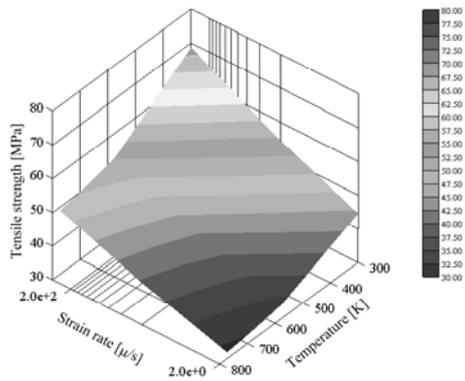


図9 強度，温度，ひずみ速度の関係（近似値）

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 伊藤寛明, 荒井政大, 松井裕太, 井野友博, ガラスレンズのモールドプレス成形試験と数値シミュレーション, 計算数理工学論文集, 査読有, Vol.10, 2010, pp.33-38.
- ② Hiroaki Ito, Masahiro Arai, Tsutomu Kodera, Tomohiro Ino, Manabu Yasui and Masaharu Takahashi, Numerical Simulation and Press Molding of Glass Micro Devices, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 査読有, Vol.4, No.11, 2010, pp.1615-1626.
- ③ Hiroaki Ito, Masahiro Arai, Tsutomu Kodera and Tomohiro Ino, Strain Rate and Temperature Dependencies on Strength Property of Glass Material, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 査読有, Vol.4, No.10, 2010, pp.1511-1519.
- ④ 安井学, 荒井政大, 高橋正春, 伊藤寛明, 井野友博, 金子智, 平林康男, 前田龍太郎, WLF 則がガラスインプリント解析に

与える影響の検討, 電気学会論文誌 (E), 査読有, Vol.130, No.10, 2010, pp484-487.

- ⑤ Manabu Yasui, Masahiro Arai, Hiroaki Ito, Tomohiro Ino, Masaharu Takahashi, Satoru Kaneko, Yasuo Hirabayashi, Ryutarō Maeda, Numerical Simulation of Glass Imprinting for Molding Temperature Prediction, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol.49, No.6, 2010, pp. 06GL11-1~06GL11-4.
- ⑥ 伊藤寛明, 荒井政大, 小寺力, 井野友博, 安井学, 高橋正春, ガラスマイクロプレス成形に関する数値シミュレーション, 日本機械学会論文集 (A 編), 査読有, Vol.76, No.761, 2010, pp.18-25.
- ⑦ Masahiro Arai, Yuusuke Kato and Tsutomu Kodera, Characterization of the thermo-viscoelastic property of glass and numerical simulation of the press molding of glass lens, Journal of Thermal Stresses, 査読有, Vol.32, 2009, pp.1235-1255.

〔学会発表〕（計7件）

- ① 松井裕太, 伊藤寛明, 板垣大輔, 荒井政大, ガラスのマイクロ・ナノインプリント成形に関する有限要素シミュレーション, 第60回理論応用力学講演会, 2011.3, 東京工業大学.
- ② 伊藤寛明, 荒井政大, 松井裕太, 井野友博, ガラスレンズのモールドプレス成形試験と数値シミュレーション, 計算数理工学シンポジウム, 2010.12, 新潟大学駅南キャンパス.
- ③ 松井裕太, 荒井政大, 伊藤寛明, 井野友博, ガラスのナノ・マイクロインプリントに関する数値シミュレーション, 日本機械学会 2010 年次大会, 2010.9, 名古屋工業大学.
- ④ Hiroaki Ito, Masahiro Arai, Tsutomu Kodera, Tomohiro Ino, Manabu Yasui and Masaharu Takahashi, Numerical Simulation and Press Molding of Glass Micro Devices, 2010 M&M international symposium for young researchers, March 1-3, 2010, Pasadena, USA.
- ⑤ Manabu Yasui, Masahiro Arai, Hiroaki Ito, Tomohiro Ino, Masaharu Takahashi, Satoru Kaneko, Yasuo Hirabayashi and Ryutarō Maeda, The Numerical Simulation of Glass Imprinting for Molding Temperature Prediction, International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Nov. 16-19, 2009, Sapporo, Japan.
- ⑥ 井野友博, 伊藤寛明, 小寺力, 荒井政大, ガラスのマイクロインプリントに関する有限要素シミュレーション, 日本機械学会 2009 年度年次大会, 2009.9, 岩手大学.

- ⑦ 小寺力, 荒井政大, 伊藤寛明, 井野友博, 安井学, ガラスのマイクロプレス成形に関する数値シミュレーション, 日本機械学会北陸信越支部第 46 期総会・講演会, 2009.3, 富山大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荒井 政大 (ARAI MASAHIRO)
信州大学・工学部・教授
研究者番号 : 30260532

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

伊藤 寛明 (ITO HIROAKI)
信州大学・工学部・助教
研究者番号 : 70534981