

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

PRESS MOLDING AND NUMERICAL SIMULATIONS OF GLASS LENS

伊藤 寛明¹⁾, 荒井 政大²⁾, 松井 裕太³⁾, 井野 友博⁴⁾

Hiroaki ITO, Masahiro ARAI, Yuta MATSUI and Tomohiro INO

- 1) 信州大学工学部機械システム工学科 (〒380-8553 長野市若里4-17-1, E-mail: h-ito@shinshu-u.ac.jp)
 2) 信州大学工学部機械システム工学科 (〒380-8553 長野市若里4-17-1, E-mail: arai@shinshu-u.ac.jp)
 3) 信州大学大学院工学系研究科 (〒380-8553 長野市若里4-17-1, E-mail: yuta@str1.shinshu-u.ac.jp)
 4) 株式会社IHI (〒135-8710 江東区豊洲三丁目1-1)

In the present paper, some experiments for press molding of lens and its numerical simulations using finite element method were investigated. Thermo-viscoelastic property of the BK-7 glass specimen was estimated using unidirectional compression creep test based on traditional thermo-viscoelastic theory. The adaptive condition of molding temperature which given appropriate transcription profile of the glass was investigated by the experimental tests. Moreover, numerical simulation for press molding of the glass was carried out by finite element method using universal FEM code (ANSYS ver.11.0). As a result of comparing experimental results with numerical ones, it was confirmed that the surface profile of the lens estimated by FEM approximately agreed with experimental value.

Key Words: Press Molding, Glass Lens, Thermo-Viscoelasticity, Creep Test, Finite Element Method

1. 結論

近年、デジタルカメラや医療機器など、様々な分野において光学機器の需要が高まっており、使用される光学デバイスの製品性能向上・生産効率のさらなる向上が求められている。現在、光学デバイスの多くは軽量かつ安価なプラスチックレンズにより製造されているが、高解像度が要求されるデジタルカメラや液晶プロジェクタ、高温環境下で用いられる車載用カメラなどにおいては、光学性能や耐熱性に優れたガラスレンズが一般的に採用される⁽¹⁾。

従来、ガラスレンズは、研削や研磨による加工法が一般的であったが、これらの方法は球面レンズを対象とした加工法であり、ラインフォーカスレンズや非球面レンズの加工は非常に困難であった。そこで、モールドプレス成形法が注目され、現在では、非球面レンズやマイクロレンズアレイを始めとするマイクロ・ナノ光学デバイスの製造方法として一般的に認知されている^(2,3)。

ところで、ガラス材料は典型的な熱粘弾性体⁽⁴⁾であり、応力ひずみ関係や線膨張係数といった種々の機械的特性が時間と温度に依存する。そのため、ガラスのモールドプレス成形

に際しては、成形温度、成形圧力、冷却時間などの成形パラメータを慎重に決定する必要がある^(5,6)。成形条件が不適切な場合には、十分な形状転写性が得られず形状誤差を生じることや、レンズ内部に残留応力が発生し割れてしまうなどの問題が発生する。

そこで、本研究では、ガラス材料の熱粘弾性特性の同定を行い、有限要素法コードANSYSを用いてガラスレンズのモールドプレス成形における最適成形条件を数値解析により導出することを目的としている。まず、ガラス材料に対して、様々な温度でクリープ試験を実施し、ガラスの熱粘弾性特性の同定を行う。さらに、クリープ試験より得られた熱粘弾性特性を用いて、種々の球面レンズのモールドプレス成形解析を行い、実験値と解析値との比較を行った。

2. 材料特性の測定

2.1. 熱粘弾性特性の同定

本研究では、熱粘弾性体であるガラスの構成方程式を、一軸圧縮クリープ試験により算出した。一般に、線形熱粘弾性体には、時間-温度換算則⁽⁷⁾が成り立つことが知られている。すなわち、複数の温度条件下で測定された緩和弾性係数は、対数時間軸上で平行移動させることにより一本の

カーブ（マスターカーブ）に一致させることができる。これを時間-温度換算則と呼び、このときの平行移動量が、ガラスの粘弾性特性の温度依存性を示すシフトファクターとなる。

今回、評価対象のガラス試料には、カメラ用レンズやプリズムのガラス素材として広く用いられているBK-7を選定した。Table 1にBK-7の各種特性値を示す。なお、一軸圧縮クリープ試験には、直径10mm、高さ10mm（上下面のみ鏡面加工品）の円柱状試験片を使用し、円柱試料の上面に、圧縮荷重392Nを加えて試験を実施した。

クリープ試験により得られたBK-7の緩和せん断弾性係数をFig. 1に、また、シフトファクターの自然対数 $\ln\alpha_0$ を縦軸に、絶対温度の逆数 $1/T$ を横軸にとり整理したグラフをFig. 2に示す。各温度における緩和せん断弾性係数は、横軸を対数時間としたグラフにおいて同じ形状を示していることから、時間-温度換算則により構成方程式の温度依存性を取り扱うことの妥当性が確認できる。得られた熱粘弾性特性を、後述の数値解析に用いるため、Fig. 1における570°Cの緩和せん断弾性係数をマスターカーブとし、その特性をFig. 3に示す3要素Maxwellモデル⁽⁸⁾により近似した。

未定係数に関して探索計算を行った結果として得られたMaxwellモデルにおける弾性定数 G_i 、及び緩和時間 $\lambda_i = \eta_i/G_i$ をTable 2に示す。なお、 η_i は粘性係数、 $G(\infty)$ は無限時間経過後の弾性係数である。

シフトファクターについては、粘性流動の活性化エネルギーを用いて、以下のNarayanaswamyの式⁽⁹⁾により近似した。

$$\ln\alpha_0(T) = \frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \quad (1)$$

ここで、 ΔH は粘性流動速度の活性化エネルギー [kJ/mol]、 R は気体定数 ($=8.31 \times 10^{-3}$ [kJ/(mol·K)])、 T_0 は基準温度 [K]、 T は温度 [K]である。式(1)の $\Delta H/R$ は、Fig. 2におけるグラフの傾きと等しくなることから、各シフトファクターのプロットを最小2乗法により近似し、その傾きより $\Delta H/R$ を求めた。その結果、BK-7の場合では、 $\Delta H/R=73001$ [K]であった。

なお、本論文においては緩和弾性係数の算出方法について概略のみを示したが、詳細については、既発表論文⁽⁶⁾を参照いただきたい。

2.2. 線膨張係数の測定

熱機械分析装置（TMA-50、(株)島津製作所製）を用い、室温から600°Cの温度域におけるBK-7の線膨張係数 ρ の測定を行った。得られた計測データをもとに、4次の線形多項式を適用し、次式にて線膨張係数を温度 T の関数として近似した。

$$\rho(T) = \alpha_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \alpha_3 T^3 + \alpha_4 T^4 \quad (2)$$

得られた近似係数 $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_4$ をTable 3に示す。

Table 1 Specifications of glass specimen.

Glass type	BK-7
Glass transition temperature [°C]	576
Deformation point [°C]	625
Instantaneous elastic modulus [GPa]	80
Instantaneous Poisson's ratio	0.205

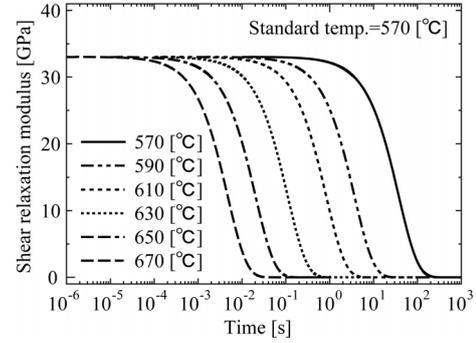


Fig.1 Shear relaxation modulus of BK-7.

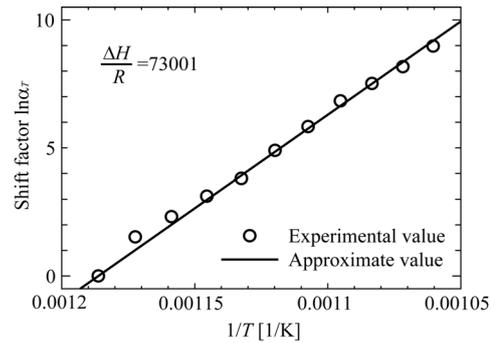


Fig.2 Shift factor of BK-7 approximated by Narayanaswamy's equation.

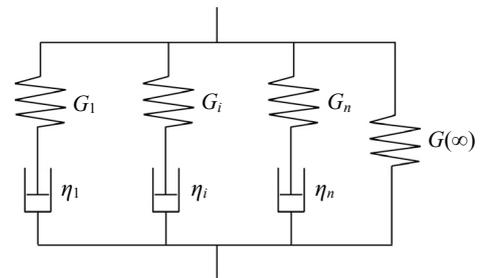


Fig.3 Maxwell model for relaxation modulus.

Table 2 Coefficients of Maxwell model for BK-7.

Coefficient [GPa]		Relaxation time [s]	
G_1	16.356	λ_1	37.0
G_2	16.356	λ_2	38.0
G_3	0.328	λ_3	43.0
$G(\infty)$	0.201 [MPa]		

Table 3 Coefficients of thermal expansion of BK-7.

Glass type	BK-7
α_0 [K ⁻¹]	6.00×10^{-6}
α_1 [K ⁻²]	2.25×10^{-8}
α_2 [K ⁻³]	5.34×10^{-12}
α_3 [K ⁻⁴]	-3.68×10^{-13}
α_4 [K ⁻⁵]	5.85×10^{-16}

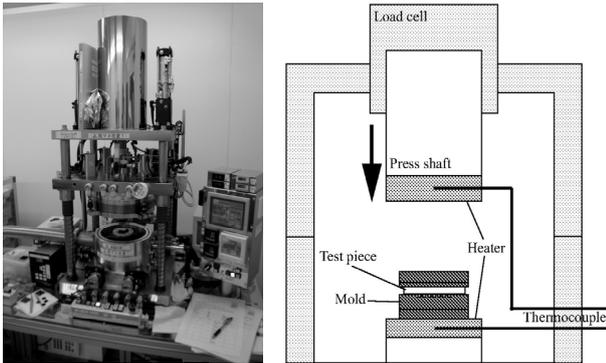


Fig.4 Equipment of hot embossing system.

Table 4 Test conditions of glass press molding.

Lens type	Plano-concave	Spherical
Temperature [°C]	630, 640, 650, 660	680, 690
Pressure [MPa]	0.79	1.57, 3.14
Press time [s]	600	600

3. 実験方法

3.1. ガラスモールド成形試験

本研究では、平凹レンズおよび球面レンズのモールドプレス成形試験を実施した。成形試験には、Fig. 4)に示すホットエンボス装置 (ASHP0101, エンジニアリングシステム㈱製) を用いた。なお、全ての成形試験は真空中にて実施した。

BK-7ガラス試験片は、平凹レンズ成形の場合には、直径10mm、厚さ10mmの円柱状試験片を、また、球面レンズ成形の場合には、直径8mmの球状試験片を用い成形実験を行った。

まず、一对の金型の間にガラス試験片を挟み込んだ後、それをチャンバー内にセットし、0.1Paまで真空引きを行う。その後、チャンバー内を加熱し、成形温度に到達した後、加圧を開始する。プレス成形後、加圧軸の変位を固定したまま、ヒーター電源を切り、冷却過程に移行する。冷却過程において、金型およびガラスは熱収縮するため、荷重は時間と共に減少し、最終的には離型する。

モールドプレス成形において、考慮すべき代表的なパラメータとして成形温度、成形圧力、成形時間が挙げられる。本研究では、成形性に及ぼす成形温度および成形圧力の影響を明らかにするために、成形時間を600sにて固定とし、プレス成形試験を実施した。Table 4)に各レンズの成形条件を示す。

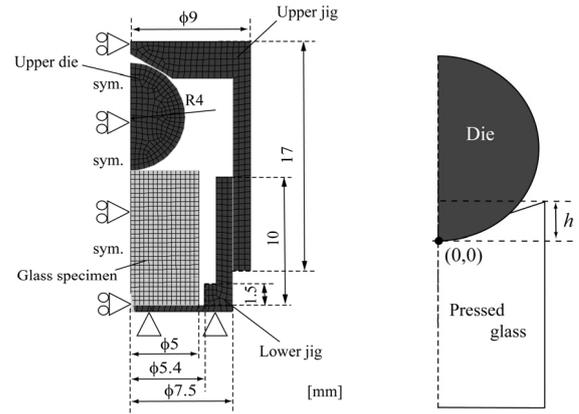


Fig.5 Illustration of FEM model for plano-concave lens and transcription height (h).

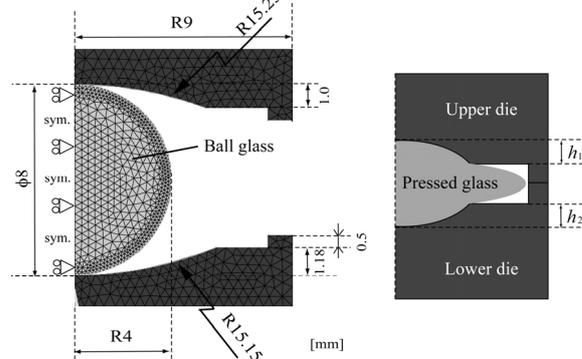


Fig.6 Illustration of FEM model for spherical lens and transcription heights (h_1 and h_2).

転写性の評価は、非接触三次元測定装置 (NH-3N, 三鷹光器㈱製) を用いて、成形後のレンズ断面形状および転写量 (転写高さ) を測定し、金型形状と比較した。

金型材料にはSUS304を用い、ボールエンドミルにより所定の球面形状を加工した。通常のガラスモールド成形では、ガラスと金型との離型を目的として、貴金属系皮膜やダイヤモンドライクカーボン (DLC) 皮膜などの離型膜が金型表面に付与されるが⁽²⁾、今回はその代替として、超高温用白色潤滑・離型剤 (ファインケミカルジャパン㈱製: 以下、BNスプレーと称す) をSUS304製金型の球面部分に塗布した。なお、予備実験の結果、BNスプレーを塗布したSUS304製金型は、BK-7ガラスに対し、融着などを起こさず、良好な離型が可能であることを確認した。

3.2. 有限要素解析

本研究では、汎用有限要素法コードANSYS ver. 11.0 (サイバネットシステム㈱) を用い、接触・大変形を考慮したガラスモールドプレス成形解析を実施した。解析モデルは、軸対称とし、平凹レンズ解析は四角形8節点2次要素、球面レンズ解析は三角形8節点2次要素により、金型およびガラス試験片をメッシュ分割した。Figs. 5-6)に平凹レンズ、球面

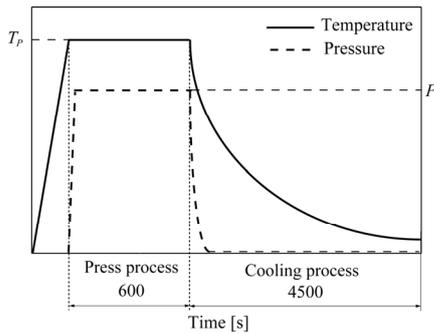


Fig.7 Temperature and pressure conditions for finite element method analyses.

Table 5 Thermal properties of die and glass materials.

Material	SUS304	BK-7
Density [kg/m ³]	8030	2510
Specific heat [J/(kg·K)]	502	858
Thermal conductivity [W/(m·K)]	16.3	1.11

レンズの解析モデルをそれぞれ示す。なお、本研究にて評価する転写高さ (h , h_1 , h_2) は同図で示される通りに定義した。また、解析に使用した成形シーケンスをFig. 7に示す。なお、図中、 T_p は成形温度 (630~690 °C) , P は成形圧力 (0.79, 1.57, 3.14MPa) をそれぞれ示す。

本研究にて実施した数値解析の流れについて説明する。まず、所定の成形温度にて金型上面に圧力を加えることによって、金型形状をガラス材に転写させるための構造解析を実施した。その際には、金型、ガラス試験片はいずれも温度分布はなく、成形温度で均一な状態として取り扱った。

続いて、成形終了後の解析モデルに対して、冷却過程に関する非定常熱伝導解析^(6, 10)を行い、ガラスレンズ内部の温度分布の時刻歴を算出した。その際、モデル外周部に実測温度データを冷却条件として与えた。なお、ガラス試験片の冷却は、金型との接触熱伝導のみで行われるものとして取り扱い、ガラス試験片と金型との接触熱抵抗を考慮した。Table 5に解析に用いた金型およびガラスの熱的特性を示す。

最後に、上記熱伝導解析にて算出された各時間におけるレンズ内部の温度分布を入力条件とし、冷却工程に関する構造解析を実施した。

なお、本研究では、ガラス成形性に及ぼす摩擦係数 μ の影響について調査するため、 $\mu=0, 0.2$ と変化させ、数値解析を実施した。

4. 実験結果および考察

4.1. 平凹レンズの成形試験および有限要素解析

平凹レンズにおいて、転写高さ (Fig. 5中の h [mm]) に及ぼす成形温度の影響について調査した。Fig. 8に実験結果と解析結果との比較結果を示す。実験結果、解析結果のいずれも、成形温度の上昇に伴い、転写高さが増加している。これは、

温度上昇に伴い、ガラスの粘性が低下し、流動性が向上したためである。また、640, 650°Cにおける解析結果が実験結果よりも大きな値を示したが、両者の差は非常に小さく、数値解析によって、成形温度の上昇に伴う転写高さの増加傾向を高精度に表現できることが確認できた。

Fig. 9に各温度での成形終了後のレンズ表面形状を示す。横軸はレンズ中心からの水平距離であり、縦軸は転写高さである。いずれの成形温度においても、形状転写面、すなわち球面部分の形状は、実験結果と解析結果は高い精度で一致している。また、金型とガラスが直接接触していない外周部 (金型からの負荷が直接かからない部分) においても、解析結果は実験結果とほぼ同様の傾向を示しており、解析誤差はわずかであることが確認できる。

成形後の球面部分の形状誤差をより詳細に調査するため、成形温度の最も高い660°Cの結果に関して、実験結果と解析結果のそれぞれについて設計値との形状誤差に注目した。Fig. 10に実験結果と設計値 (曲率半径: 4mm) との誤差、および数値解析結果 ($\mu=0, 0.2$) と設計値との誤差をそれぞれ示す。本研究にて得られた実験結果は、解析結果とほぼ一致しており、実験結果と解析結果との最大形状誤差は6 μ mであった。これは最大変形量 (最大転写高さ) 1.6mmに対して0.3%と非常に小さい値であった。

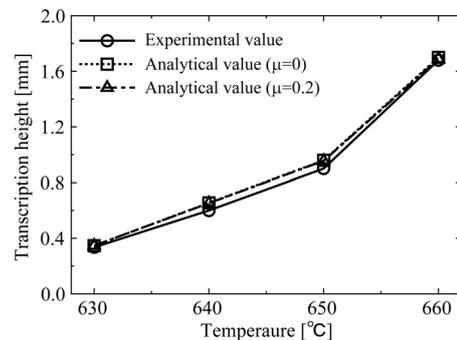


Fig.8 Relationship between molding temperature and transcription height. ($\mu=0, 0.2$)

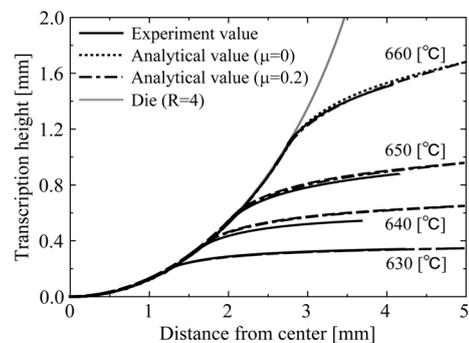


Fig.9 Comparison of cross-section profiles obtained by press molding and numerical simulation for plano-concave lens. ($\mu=0, 0.2$)

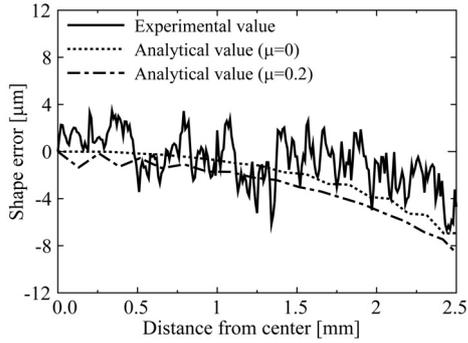


Fig.10 Comparison of shape errors between design value and lens pressed at 660°C.

一般に、モールドプレス成形の場合、レンズ形状は中心から離れた外周部ほど熱収縮の影響が顕著になるため、転写形状の設計値に対する誤差は大きくなる。本解析ではその傾向を含め解析結果と実験結果が一致している。このことから本解析手法の精度が非常に高いことが実証された。

ところで、摩擦係数 μ を0, 0.2として数値解析を実施したが、Fig. 10より、形状誤差に及ぼす影響は1~2 μm 程度と非常に小さいことが確認された。この結果に関しては、後述の球面レンズのプレス成形の結果と併せて考察する。

なお、Fig. 10に示す実験結果と設計値との誤差のグラフにおいて数 μm のばらつきが確認された。今回の実験では、前述の通り、金型表面に離型剤としてBNスプレーを塗布しているが、BNスプレーの平均粒子径が5 μm 程度である。成形終了のレンズは、表面を超音波洗浄した後に形状測定を行っているが、BN粒子の残存、もしくはレンズ表面にBN粒子形状が転写してしまっていることから、このようなばらつきが生じたと考えられる。

4.2. 球面レンズの成形試験および有限要素解析

次に、球面レンズのプレス成形試験結果と数値シミュレーション結果について示す。球面レンズ成形においては、成形温度を680, 690°C、成形圧力を1.57MPa、成形時間を600sとし試験を行った。

Figs. 11-12にそれぞれ成形温度680°C、690°C成形品の球面部分の形状測定結果と解析結果を示す。なお、図中の転写高さは、Fig. 6にて示す通り、成形品上面の転写高さを h_1 、成形品下面の転写高さを h_2 とした。680°C、690°Cいずれの解析結果においても、成形品の上下面ともに高精度に実験結果を表現できていることが確認できる。特に、680°C成形品の上面の中心部近傍において、金型形状を完全に転写できていない未転写部の形状に関しても、解析結果は実験結果を表現できており、解析精度の高さを確認することができる。

680°C成形品と比較して、良好な形状転写性を示した690°C成形品に関して、さらに詳細に調査するために、球面部分の解析結果と設計値との形状誤差を調査した。その結果をFig. 13に示す。

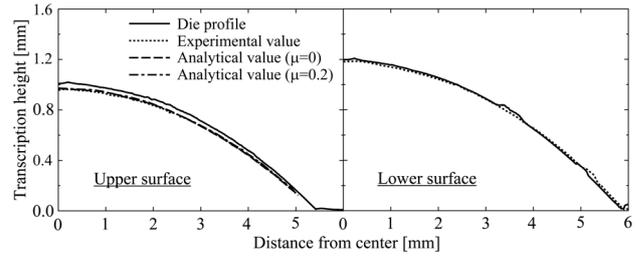


Fig.11 Comparison of cross-section profiles obtained by press molding and numerical simulation for spherical lens pressed at 680°C. ($\mu=0, 0.2$)

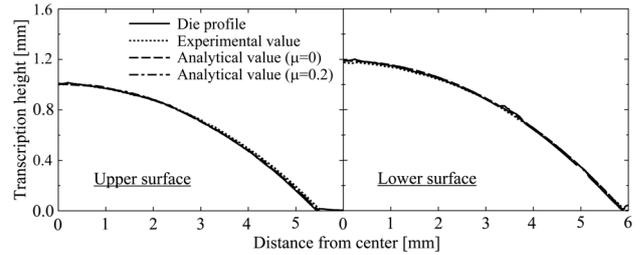


Fig.12 Comparison of cross-section profiles obtained by press molding and numerical simulation for spherical lens pressed at 690°C. ($\mu=0, 0.2$)

解析結果と設計値との誤差は、最大10 μm 程度であった。約10 μm の形状誤差は、SUS304（平均線膨張係数 $\alpha_d=18\mu\text{m}$ 程度）とBK-7（平均線膨張係数 $\alpha_g=10\mu\text{m}$ 程度）との線膨張係数の差（約8 μm ）により生じたものであると考えられるため、690°C、1.57MPa、600sの成形条件で十分な形状転写が行われていると考えられる。このことは、実際のモールドプレス成形では、金型とガラスとの熱収縮を考慮した金型の設計が必要であることを示唆している。

次に、成形圧力の影響を調査するため、成形温度を680°C、成形圧力を3.14MPaとし成形解析を行った。その際の解析結果と設計値との形状誤差をFig. 14に示す。解析結果の設計値に対する誤差は、最大20 μm 程度であり、前述の690°C、1.57MPaの結果よりも大きな誤差を生じた。つまり、成形圧力を高く設定することによって、形状転写性の改善は可能であるが、成形温度を高く設定した方が、形状転写性の改善に効果的であると考えられた。また、成形圧力を高めた場合、成形後の残留応力が高くなる傾向が確認された。

Table 6に690°C、1.57MPa成形品、および680°C、3.14MPa成形品の成形後の残留応力の最大・最小値を示す。残留応力の最小値は同等であるが、最大値には大きな差が確認できる。ガラスの残留応力が高い場合には、成形中に破損してしまうため、できるだけ残留応力を低減させる必要がある⁽¹¹⁾。以上より、本研究においては、成形条件690°C、1.57MPaが最適成形条件であると結論付けられた。

平凹レンズ成形解析と同様に、球面レンズ成形解析においても、成形性に及ぼす摩擦係数の影響は顕著に確認されなかった。これは、成形時間を600sと比較的長く設定したことに起因しており、ガラスが十分に変形した後のレンズ

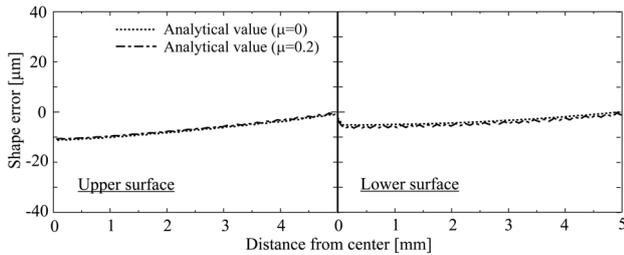


Fig.13 Comparison of cross-section profiles obtained by numerical simulation for spherical lens pressed at 690°C, 1.57MPa. ($\mu=0, 0.2$)

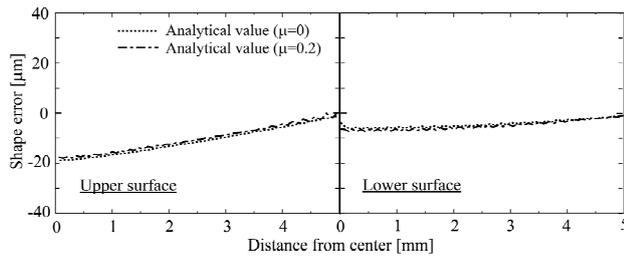


Fig.14 Comparison of cross-section profiles obtained by numerical simulation for spherical lens pressed at 680°C, 3.14MPa. ($\mu=0, 0.2$)

Table 6 Residual stresses (σ) of spherical lens after press molding obtained by numerical simulations.

Condition	690°C, 1.57MPa	680°C, 3.14MPa
σ_{\max} [MPa]	44.2	77.2
σ_{\min} [MPa]	0.28	0.15

形状について評価したためであると考えられる。つまり、摩擦係数はガラスの変形速度に影響を及ぼすものであり、成形時間を長く設定することにより、転写性に及ぼす影響を低減させることが可能であると判断される。

5. 結論

本研究では、BK-7 ガラスを用い、平凹レンズ、球面レンズのガラスモールドプレス成形に関する有限要素解析を実施した。また、成形試験を実施し、数値解析結果との比較を行うことにより、解析精度の評価およびレンズの最適成形条件の導出を行った。以下に本研究にて得られた結果を示す。

- (1) 平凹レンズ成形に関する数値解析を実施し、成形温度の上昇に伴う転写高さの増加傾向を高精度に表現できることが確認できた。また、数値解析結果と成形試験結果との断面形状の比較において、誤差率は0.3%と非常に小さく、十分な精度の解析が実現されたことを確認した。
- (2) 球面レンズ成形解析においても、解析結果は成形試験結果を高精度に表現できることが確認できた。また、成形温度、成形圧力を高く設定し数値解析を実施した結果、

形状転写性の改善には、成形圧力を高くするよりも成形温度を高く設定することが効果的であった。なお、今回のモデルにおける最適成形条件は、成形温度 690°C、成形圧力 1.57MPa、成形時間 600sであった。

- (3) 本研究では、金型として SUS304 を使用し成形試験を行ったが、ガラス材との平均線膨張係数の差が大きく、結果として設計値との誤差を生じてしまった。今後は、金型を超硬合金に変更して、より現実的なガラスモールド成形試験および数値解析を実施する予定である。

謝辞

本研究は、科学研究費（基盤研究 (C) : No. 20560071）の助成を受けたものであり、関係各位に謝意を表す。

参考文献

- (1) 中江利昭：レオロジー工学とその応用技術, (2001), フジ・テクノシステム.
- (2) 梅谷誠：プレス成形による光学ガラスレンズ作製, NEW GLASS, Vol. 13, No. 2 (1998), pp. 32-37.
- (3) 広田慎一郎, 宇野賢：ガラスモールド技術 (1), NEW GLASS, Vol. 11, No. 2 (1996), pp. 66-70.
- (4) 村上謙吉：レオロジー基礎論, (1991), 産業図書.
- (5) Allen, Y. Y. and Anurag, J. : Compression Molding of Aspherical Glass Lenses (A Combined Experimental and Numerical Analysis), Journal of the American Ceramic Society, Vol. 88, No. 3 (2005), pp. 579-586.
- (6) Arai, M., Kato, Y. and Kodera, T. : Characterization of the Thermo-viscoelastic Property of Glass and Numerical Simulation of the Press Molding of Glass Lens, Journal of Thermal Stresses, Vol. 32 (2009), pp. 1235-1255.
- (7) Morland, L. W. and Lee, E. H. : Stress Analysis for Linear Viscoelastic Materials with Temperature Variation, Transaction of the Society of Rheology, Vol. 4 (1960), pp. 233-263.
- (8) Ward, I. M. and Sweeney, J. : An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers, 2nd Edition (2004), John Wiley & Sons Inc.
- (9) Narayanaswamy, O. S. : A Model of Structural Relaxation in Glass, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 54, No. 10 (1971), pp. 491-498.
- (10) 関信弘：伝熱工学, (1988), 森北出版.
- (11) Ito, H., Arai, M., Kodera, T. and Ino, T. : Strain Rate and Temperature Dependencies on Strength Property of Glass Material, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 4, No. 10 (2010), pp. 1511-1519.