

ガラスレンズの成形シミュレーション

前田 一輝*¹福田 達也*²生川 遼太*²

【要 旨】

様々な産業で使用されるガラスレンズは、プレス成形の条件の検証に長時間を要するため、CAEを用いて成形条件等の事前検証を行うことにより、短納期化やコスト削減の効果が見込まれる。本研究では成形の主要な条件である温度を変化させた FEM 解析による熱粘弾性解析を行い、形状への影響を検証した。

1 はじめに

分析機器や航空宇宙・医療分野などの光学装置で使用されるガラスレンズは、近年、装置の高機能・高精度化に伴い、様々な材質のガラスや非球面レンズなどの複雑な形状を持つようになっており、その生産技術の向上はますます重要になっている。このようなガラスレンズは多品種・小ロットの製品が多く、また高い加工精度が要求される。このようなガラスレンズの形状を作るため、金型によるプレス加工が一般的に用いられる。プレス加工は、発注から最終製品になるまで、金型設計・素材形状の設計、成形時のプレス圧や温度条件など様々な検討を行い、試作、検査・金型修正など最終製品になるまで高い技術力と長期間の工程を要するものが多い。

ガラスの特徴である耐久性・耐熱性などは樹脂のレンズと比較し、優位な点が多いが、その特徴から製品に必要な精度の形状を作ることが難しい。

本研究では実際に加工をされている金型プレスによるレンズ加工の FEM 解析を行い、工程時間の短縮とコストの削減を目的に、条件を変更させた時の形状を検証する。

2 解析モデルについて

2. 1 熱粘弾性モデル

2. 1. 1 粘弾性モデル¹⁾

ガラスは粘弾性体の性質を持ち、粘弾性は変形時にエネルギーを蓄積される弾性挙動とエネルギーが散逸される粘性挙動を併せ持ち粘性挙動は時間依存性を持つ。

粘弾性モデルを表現するための構成則は複数提案されているが、本研究では図1に示す一般化マクスウェルモデルを使用する。バネ要素の剛性を μ_i 、ダッシュポット要素の粘性を η_i 、緩和時間 τ_i を $\tau_i = \eta_i / \mu_i$ とし、次式の Prony 級数形式のせん断弾性係数で表す。

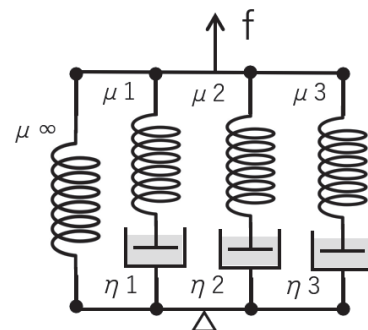


図1 一般化マクスウェルモデル

* 1 中丹技術支援室 主任研究員

* 2 株式会社東海エンジニアリングサービス

$$G(t) = G_0 \left(\alpha_\infty + \sum_{i=1}^3 \alpha_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right)$$

G(t):緩和せん断弾性率

G₀:瞬時弾性率:時刻 0[s]のときのせん断弾性率

α:相対係数

今回、実際の現場で使用されている BK-7 のガラスを使用するため、既報論文^{2, 3)}を参考に表 1、表 2 に示す物性値を採用する。

表 1 ガラス材の材料定数

ガラス素材	BK-7
ガラス転移点[°C]	576
瞬時弾性率[GPa]	80
瞬時ポアソン比	0.205

表 2 一般化マクスウェルモデルの係数

緩和せん断係数[GPa]	G1	G2	G3	α∞
	16.356	16.356	0.328	0.201 [MPa]
緩和時間 [s]	τ1	τ2	τ3	
	37.0	38.0	43.0	

2. 1. 2 時間 - 温度の重ね合わせ

加熱されたガラスの温度挙動をモデル化するためにマスターカーブを時間 - 温度の重ね合わせを次式の Tool-Narayanawamy 式により行う。

$$\ln[a(T)] = \frac{H}{R} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right)$$

α(T): 温度 T における緩和せん断係数

H/R=73001 [K]

T_r:標準温度(570°C)

2. 2 解析モデル

2. 2. 1 レンズ形状

解析モデルは上部及び下部の金型により、プリフォームガラスに形状転写させる。使用した非球面レンズ形状は下記式⁴⁾により算出した。

$$Z(x) = \frac{cx^2}{1+\sqrt{1-(1+k)c^2x^2}} + a_4x^4 + a_6x^6 + a_8x^8 + a_{10}x^{10} + a_{12}x^{12}$$

表 3 非球面係数

	上部	下部
R	-16.8873	12.4294
K	15.5054	-1
a4	3.630255e-03	-2.214610e-03
a6	-2.273565e-04	1.293584e-04
a8	2.572092e-05	-1.626193e-05
a10	-1.404258e-07	8.249186e-07
a12	3.128379e-08	-9.581133e-09

C:曲率半径 (1/R)

2. 2. 2 解析モデル

本研究で使用した、解析モデルの上部及び下部の金型形状、プリフォームガラス、解析に使用したメッシュを図 2 に示す。

解析には ANSYS Mechanical 2020[®]構造 - 過渡伝熱連成解析を使用し、形状は同社の SpaceClaim[®]によりモデル形状を作成した。

解析条件は 2 次元軸対称モデルとし、金型下端部を上下方向に拘束し、金型の上端部に圧力を加え、温度を同様に上端部、下端部に与えた。またガラスと金型の接触部分の摩擦係数を 0.1 とした。

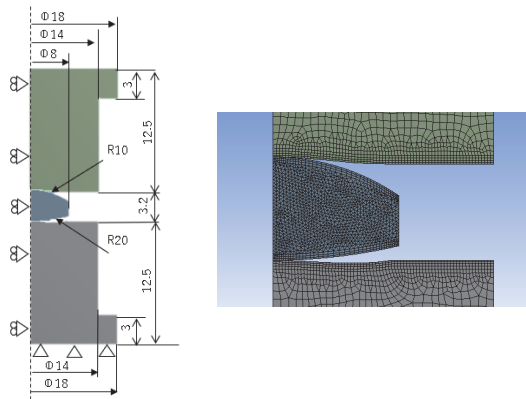


図2 左：モデルの金型及びプリフォームガラス形状 右：メッシュ

金型には超硬材（WC）を使用し、表4材料定数を示す。

表4 金型（超硬材）の材料定数

材質	WC
ヤング率[GPa]	630
ポアソン比	0.2

また、ガラス及び金型材の熱特性を表5に示す。

表5 ガラス及び金型の温度特性

材質	BK-7	WC
密度[kg/m ³]	2510	13300
比熱[J/(kg・K)]	858	2100
熱伝導率[W(m・K)]	1.11	63
線膨張係数(1/K)	図3参照	4.6×10^{-6}

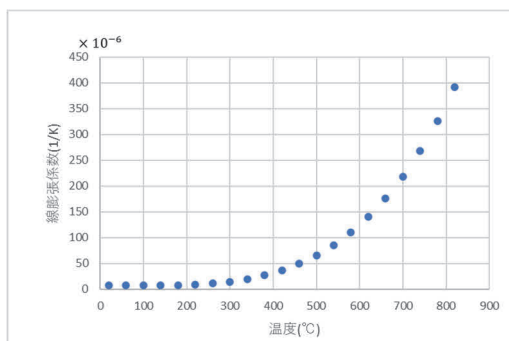


図3 線膨張係数(BK-7)

2. 2. 3 加熱—加圧条件

温度及び圧力の条件を図4に示す。金型は段階的に温度を上昇させ、所定の温度で一定時間が経過した後、加圧プレスを行い、その後、段階的に温度を低下させてレンズが常温になるまで冷却する。また今回の解析の比較のため、5℃、10℃加算したもも行う。

今回、参考にしたBK-7のガラス転移点は576度であり、実際に使用しているBK-7のガラス転移点498度との差を温度に加算している。よって成形時の温度は643℃、648℃、653℃で解析を行った。

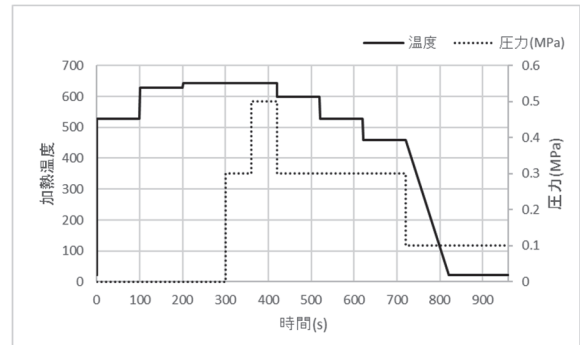


図4 加熱・加圧条件

3. 実験結果及び考察

3. 1 解析結果

3. 1. 1 変形量について

各成形温度のレンズ形状の違いについて、図5に示す。

成形温度が高いほど、変形量は大きくなり、レンズ形状の転写が出来ていることがわかる。5℃、10℃の違いで大きな違いが出てくる。実際のプレス成型金型には外周にストッパーがついており、所定の厚みより下回ることなく、また装置には目的の変位量に至るまで加圧時間が延長される制御が組み込まれている。

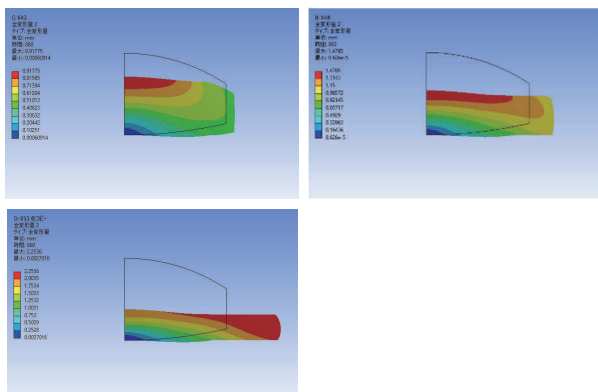


図5 変位量コンター図 (960s)
(左上:643°C 右上:648°C 左下:653°C)

3. 1. 2 転写の差について

各成形温度によるレンズ形状の転写結果を図6に示す。なお評価は非球面レンズの範囲で、補正した非球面レンズ式からガラスレンズの形状を減算した誤差で表示している。

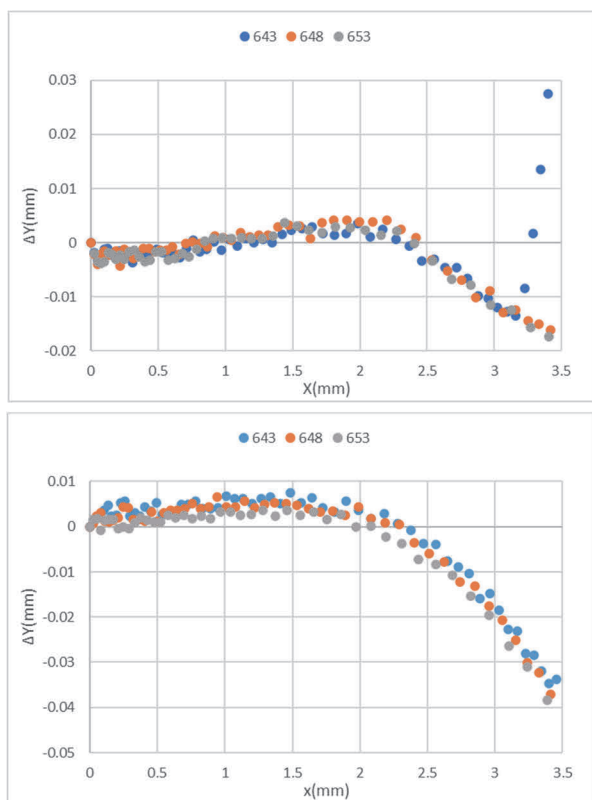


図6 形状誤差 (上:上面 下:下面)

上面の 643°Cは加圧もしくは時間不足により、形状が最後まで転写が出来なかったことがわかる。

またレンズの外周になるほど、差が大きくなっている。加熱された状態で形状が転写されるため、冷却すると熱収縮により形状が小さくなるためと考えられる。また成形温度の違いによる形状の差も確認できる。

4 まとめ

本研究では非球面レンズのプレス工程をFEM解析で行い成形温度の条件による表面形状の違いを表すことができた。また同解析で時間やプレス圧力についての条件変更も行うことができるため、加工条件の事前検証を行うことが可能である。

今回、解析モデルでは輻射や対流等の伝熱の影響は考慮していない。より精度の高い解析を行うためにはそういった熱の影響を調べる必要がある。

解析に必要な加工時のガラスの材料物性が一般的になっていないため、今後は材料の計測からの支援を行えるようにしていく必要があると考える。

(参考文献)

- 1) Ansys-mechanical-help 材料リファレンス-非線形材料特性-粘弾性
- 2) M. Arai, Y. Kato, T. Kodera: Journal of Thermal Stresses 32 1235-1255 (2009)
- 3) 伊藤寛明、新井政大、松井裕太、井野友博：計算数理工学論文集, Vol. 10(2010), pp. 33-38.
- 4) JISB0900-12 光学素子システム用の製図手法 第12部 (2012)