613 有限要素法によるガラスレンズのモールドプレス解析

Numerical Analysis for Press Forming of Aspherical Glass Lens
by Finite Element Method

荒井 政大 (信州大)

○辰 己 正和 (信州大・院)

杉本 公一 (信州大)

伊藤 寛明 (チノンテック(株))

松倉 利顕 (チノンテック(株))

Masahiro ARAI, Shinshu University, 4-17-1, Wakasato, Nagano, Japan

Masakazu TATSUMI, Graduate Student, Shinshu University, 4-17-1, Wakasato, Nagano, Japan

Ko-ichi SUGIMOTO, Shinshu University, 4-17-1, Wakasato, Nagano, Japan

Hiroaki ITO, Chinontec Co., 4710, Nakasu, Suwa City, Nagano, Japan

Toshiaki MATSUKURA, Chinontec Co., 4710, Nakasu, Suwa City, Nagano, Japan

1. 緒 論

デジタルカメラや携帯電話、医療機器など、ガラス製光学レンズの用途は年々拡大しており、光学機器のさらなる性能向上を目的として非球面レンズが積極的に利用されています。これら光学レンズ成形法として期待されているモールドプレスによる成形法は、大量生産が可能である、非球面などの複雑な形状に加工が可能など、種々の利点を有している。しかしながら、ガラスの構成方程式が粘弾性特性を示す、冷却中に温度分布が発生するなどの様々な理由から成形条件の最適値を事前に予測することは極めて困難であり、製造現場においては経験的知見をもとに成形条件を決定しているのが現状である。

そこで本研究では、ガラスレンズのモールドプレス成形に関し、成形プロセスの最適条件を把握することを目的として、有限要素法による数値シミュレーションを実施した。今回の報告では、非球面レンズ成形用金型を用いてガラス内の非定常熱伝導に伴う温度分布の時刻歴を考慮した解析を行い、冷却過程において生じる内部応力の分布、さらにはレンズ形状に及ぼす成形パラメータの影響について考察を行った。

2. 理 論

2.1 線形粘弾性体の構成方程式 本研究では、ガラスが線形熱粘弾性体であるものと仮定して議論する⁽¹⁾。線形熱粘弾性体においては、応力の時刻歴 $\sigma(t)$ と、それに対するひずみ $\varepsilon(t)$ との間に重ね合わせの原理が成立する。すなわち、両者の関係を、次式のような Duhamel の畳込み積分により記述することができる⁽²⁾。

$$\varepsilon(t) = \int_0^t J(t-\tau) \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau + \sigma(0)J(t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $J(t)$ は $t=0$ で単位ステップ状の応力を作用させた場合のひずみの時間変化であり、クリープ関数と呼ばれる。

同様に、ひずみ履歴 $\varepsilon(t)$ に対応する応力の応答 $\sigma(t)$ は以下のように記述される。

$$\sigma(t) = \int_0^t k(t-\tau) \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} d\tau + \varepsilon(0)k(t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $k(t)$ は $t=0$ で単位ステップ状のひずみを作用させた場合の応力の時間変化であり、緩和弾性係数と呼ばれる。

時刻 $t=0$ において、式(1)と式(2)を Laplace 変換し整理すると、以下の関係が成立する。

$$\bar{k}(s) = \frac{1}{s^2 \bar{J}(s)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

Fig.1 Relaxation modulus $k(t)$ of TaF-3.

Fig.2 Shift factor of TaF-3 estimated by creep test.

なお s は Laplace 変換パラメータ、 $*$ を付した積量は各物理量の Laplace 変形を表す。式(3)の関係式より、実験的に求められたクリープ関数 $J(t)$ より、緩和弾性係数 $k(t)$ を算出することができる。

2.2 時間-温度換算則 熱粘弾性材料は、構成方程式が時間と温度の両者に依存する。ここで、緩和弾性率と温度 T および時間 t の間には時間-温度換算則が成立し、次式のように一般化できることが実験的に検証されている。

$$k(\log t, T_0) = k(\log t - \log \alpha_{T_0}(T), T) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで $\alpha_{T_0}(T)$ はシフトファクターと呼ばれ、基準温度 T_0 に対する温度 T の関数である。上式は基準温度における緩和弾性係数とシフトファクターにより任意の温度における緩和弾性係数が得られることを示している。

3. 数値シミュレーション

3.1 熱粘弾性特性の同定 本研究では、ガラス材の圧縮クリープ試験を実施した結果より、緩和弾性係数の同定を実施した。測定されたクリープ関数に線形多項式近似を行った後、Laplace 変換し $\bar{J}(s)$ を求め、これを式(3)に代入し、さらに数値 Laplace 逆変換を行うことにより実時間における

Fig.3 FEM model (aspherical lens).

Fig.4 Pressure and temperature condition in forming process.

Fig.5 Temperature distribution ($t = 332[s]$, $t_c = 300[s]$).

緩和弾性係数を算出した。Fig.1 に TaF-3 材の緩和弾性係数を示す。また、シフトファクターは、Fig.2 に示されるように、硝材のガラス転移温度 (680°C) における緩和弾性率を基準として算出したのち、得られたシフトファクターの離散データを次式⁽³⁾を用いて近似した。

$$\ln \alpha_{T_0}(T) = \frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 R は気体定数、 T_0 は基準温度、 ΔH は粘性流動の活性化エネルギーである。Fig.2 より、活性化エネルギーは、 $\Delta H=539[\text{kJ/mol}]$ となった。さらに、FEM 解析に用いるためにマスターカーブを次式で示す Maxwell モデルにより近似を行った。

$$k(t) = \sum_{i=1}^N k_i \exp\left(\frac{-t}{\lambda_i}\right) + k_{\infty} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、式(6)中の N は5とし、未知数である k_i および λ_i を探索により決定した。最終的に同定された Maxwell モデルにおける諸定数は以下のとおりである。

Fig.6 Residual stress (von Mises) ($t_c = 300[s]$).

Fig.7 Residual stress (von Mises) ($t_c = 300[s]$, uniformly temperature distribution).

$$k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = 30.88[\text{GPa}], k_5 = 1.248[\text{GPa}],$$

$$k_\infty = 1.97[\text{MPa}],$$

$$\lambda_1 = 7.0[\text{ms}], \lambda_2 = 9.0[\text{ms}], \lambda_3 = 10.0[\text{ms}],$$

$$\lambda_4 = 11.0[\text{ms}], \lambda_5 = 30.0[\text{ms}]$$

3.2 非球面レンズのプレス成形解析 本研究では Fig.3 で示されるような非球面レンズの成形シミュレーションの結果について示す。解析には汎用有限要素法コード ANSYS ver.9.0 を用いた。解析モデルには二次元軸対称モデルを用い、三角形 2 次要素を用いてガラス材を 541 要素、金型部分を 323 要素にて分割した。温度条件と圧力条件を Fig.4 に示す。

本解析では、冷却過程における伝熱解析を実施することによりレンズ内の温度分布を考慮した。ただし、温度条件は、金型およびガラス材外周部に Fig.4 に示される温度条件を与え伝熱解析を実施し、その温度データを構造解析に用いることにより実施した。本解析では、温度分布を考慮して冷却時間を 150[s], 300[s], 600[s] と変化させた場合、冷却時間を 300[s] とし温度分布考慮していない場合について解析を行い、レンズ内部の温度分布がレンズ成形に与える影響について考察を行った。

Fig.5 に冷却過程終了後の温度の分布図を示す。グラフより、レンズの中心と外周に約 2.4°C の温度差が生じていることがわかる。また、レンズ内部の温度分布を考慮しない場合の解析、温度分布を考慮した場合の解析の解析結果を Fig.6, Fig.7 に示した。これより、冷却過程においてレンズ内部に発生する温度分布が残留応力に影響を与えることが確かめられた。さらには、レンズ内部の温度分布が成形後のレンズ形状に影響を与えることを確認した。

文 献

- (1) 例えば, クリュチニコフ他, 千野英春訳, ガラスの科学, 科学普及新書, (1972), 東京図書.
- (2) 荒井政大, 中村淳之介, 辰己正和, 伊藤寛明, 松倉利顕, 杉本公一, 温度場の不均一性を考慮したガラスレンズのモールドプレス解析, 計算数理工学論文集, 第5巻, 2号, (2005), pp.177-182.
- (3) Narayanaswamy, O. S., A Model of Structural Relaxation in Glass, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol.54, No.10, (1971), pp.491-498.