414 ガラスの熱粘弾性の評価とモールドプレスシミュレーション

Evaluation of Thermo-Viscoelastic Property of Glass
and Numerical Simulation of Press Molding荒井 政大 (信州大)
辰己 正和 (キヤノン(株))○加藤 佑介 (信州大院)
松倉 利顕 (チノンテック(株))

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

Yuusuke KATOU, Graduate Student, Shinshu University

Masakazu TATSUMI, Canon Inc., 30-2, Shimomaruko 3-chome, Ohta-ku, Tokyo, Japan

Toshiaki MATSUKURA, CHINONTEC Industries, Inc., 4710, Nakasu, Suwa, Nagano, Japan

In the present paper, numerical simulation about press-molding of glass lens is investigated. Since constitutive equation of glass depend on time-history and temperature, stress relaxation is observed on the glass subjected to applied loading, and these behaviors vary drastically depending on the temperature. In the present study, creep test has been conducted to determine the thermo-viscoelastic properties of glass. The creep function obtained by the experiment has been transformed into relaxation function employing Laplace transform. Shift factor which gives the relation between the time and temperature can be determined by creep test under several temperature. In the present analysis for press-molding of glass lens, history of the temperature and its distribution is computed by unsteady heat conduction analysis prior to the analysis of cooling sequence. The total FEM analysis for press-molding are executed taking into account the nonuniformly temperature distribution in the glass lens. Residual stresses under some processing conditions are estimated, and the optimal conditions of forming process are discussed in detail.

Key Words: Press Forming, Glass Lens, Finite Element Method, Thermo-Viselastic Theory, Relaxation Modulus, Creep Function, Laplace Transform, Residual Stress

1. 緒 論

近年の情報技術、光学技術の進歩によって、デジタルカメラや光ディスクのピックアップなどをはじめとした光学デバイスの需要が増大している。それに伴い、光学素子の高精度化、生産効率の向上、生産コストの低減化が望まれている。従来、ガラス製デバイスの生産には直接研磨、化学研磨などが採用されていたが、大量生産、非球面レンズなどの複雑な形状が求められているなかでガラスモールドプレスという成形方法が注目を浴びている。しかしガラスは弾性と粘性を有し、また温度にも依存する熱粘弾性体であることから成形の最適条件を見積もるのが難しい⁽¹⁾。

著者らの研究グループでは、ガラスレンズのモールドプレス成形に関し、熱粘弾性理論に基づく数値シミュレーションを実施し、成形プロセスの最適化を目的として種々の検討を行ってきた⁽³⁾。今回の報告では、冷却過程にお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、成形過程終了後の残留応力に影響を及ぼす成形パラメータ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 本研究では試料をクリープと応力緩和という2つの特徴的な現象を有する線形粘弾性体として取り扱う。線形粘弾性体に任意の応力を作用させたとき、生じるひずみを計算する際、重ね合わせの原理を用いることができる。任意の応力に対するひずみの時間変動はDuhamelの積分形(式(1))で示され、緩和弾性係数の概念から式(2)が同様に示される。

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

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

ここで、 $J(t)$ はクリープ関数であり、時間 $t = 0$ から単位ステップ状の応力を入力した時のひずみの時間変動を表す。 $E(t)$ は緩和弾性係数であり、時間 $t = 0$ から単位ステップ状のひずみを入力した時の応力の時間変動を表す。

式(1)、式(2)に Laplace 変換を適用して整理すると Laplace 像空間上におけるクリープ関数と緩和弾性係数について以下の関係が成り立つ。

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

ここで、上付き添字「 $\bar{}$ 」は、各物理量の Laplace 変換を表す。また、 s は Laplace 変換パラメータである。

なお、本研究における計算では、大変形時の体積変化は微小であるものとする。すなわち、体積弾性率 $K(t)$ は緩和挙動を示さないものとし、以下のようにヤング率とポアソン比の瞬間弾性率を用いて表す⁽⁴⁾。

$$K(t) = K_0 = \frac{E_0}{3(1-2\nu_0)}, \quad (t \geq 0) \quad \dots\dots\dots (4)$$

上式を Laplace 変換することによって、体積弾性率の Laplace 変換 $\bar{K}(s)$ が以下のように求められる。

$$\bar{K}(s) = \frac{1}{s} \frac{E_0}{3(1-2\nu_0)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

緩和せん断弾性係数 $\bar{G}(s)$ は、緩和弾性係数 $\bar{E}(s)$ および体積弾性率 $\bar{K}(s)$ により次式により与えられる。

$$\bar{G}(s) = \frac{3\bar{K}(s)\bar{E}(s)}{9\bar{K}(s) - \bar{E}(s)} \dots\dots\dots (6)$$

式 (3), (5), (6) より、実験により求めたクリープ関数と体積弾性率から、Laplace 像空間上における緩和せん断弾性係数が算出可能であり、細野の方法を用いて数値 Laplace 逆変換することにより、実時間における緩和せん断弾性係数が求まる。

3. 数値シミュレーション

3.1 マスターカーブ、シフトファクター 基準温度における緩和弾性係数を固定し、それ以外の各温度の緩和弾性係数を対数軸上で平行移動させ一本の曲線に重ねたものをマスターカーブという。またその平行移動量よりシフトファクターを求めることができる。つまり熱粘弾性特性はマスターカーブとシフトファクターを求めることで表すことができる。本研究では、シフトファクターの近似に以下の式 (7) に示される Narayanaswamy の式を用いた⁽²⁾。実際の FEM 解析では活性化エネルギー ΔH を計算条件として与えている。

$$\ln \alpha T_0(T) = \frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \dots\dots\dots (7)$$

$\Delta H[\text{kJ/mol}]$ は活性化エネルギー、 $R[\text{kJ/mol} \cdot \text{K}]$ は理想気体の気体定数、 $T_0[\text{K}]$ は基準温度、 $T[\text{K}]$ は温度とする。

3.2 Maxwellモデルによる近似 Maxwell モデルとは、バネとダッシュポットを直列につないだものを並列に連結したもので、粘弾性特性を表す力学モデルの 1 つである。このモデルを用いてマスターカーブを近似し、解析に用いる。 $G(\infty)$ を考慮した n 要素の Maxwell モデルにおいて緩和せん断弾性係数は、以下の式で示される。

$$G(t) = \sum_{i=1}^n G_i \exp\left(\frac{-t}{\lambda_i}\right) + G(\infty) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、式 (8) 中の n は 3、として、未知数である G_i, λ_i を探索により決定した。

3.3 有限要素法によるレンズプレス成形解析 本研究では Fig.1 で示されるような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.10.0 を用いた。解析モデルには二次元軸対称モデルを用い、解析に用いるガラス材は TaF3 材とした。温度条件と圧力条件は Fig.2 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.2 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。また、冷却時間に関して、成形温度からガラス転移点までの冷却時間 t_1 、ガラス転移点以下の冷却時間 t_2 として冷却時間を 2 段階に変化させ、 $t_1 = 10, t_2 = 150, 300, 600$ の 3 通りについて解析を実施した。

Fig.3, Fig.4, Fig.5 にそれぞれの成形過程終了後の残留応力の分布図を示す。冷却時間 t_2 を長くすることにより残留応力の分布に変化はみられないが、残留応力の最大値が小さくなることがわかる。これより、冷却過程において発生するレンズ内部と外部の温度差が残留応力に影響を与えることが明らかになった。

Fig.1 FEM model (spherical lens ; R=18.5[mm])

Fig.2 Pressure and temperature condition.

Fig.3 Residual stress (von Mises) ($t_1 = 10[\text{s}], t_2 = 150[\text{s}]$).

Fig.4 Residual stress (von Mises) ($t_1 = 10[\text{s}], t_2 = 300[\text{s}]$).

Fig.5 Residual stress (von Mises) ($t_1 = 10[\text{s}], t_2 = 600[\text{s}]$).

文 献

- (1) 例えば、クリュニコフ他、千野英春訳、ガラスの科学、科学普及新書、(1972)、東京図書。
- (2) Narayanaswamy, O. S., A Model of Structural Relaxation in Glass, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol.54, No.10, (1971), pp.491-498.
- (3) 荒井政大、山本和也、中村淳之介、伊藤寛明、松倉利顕、杉本公一、有限要素法によるガラスレンズのプレス成形シミュレーション、*機論 (A)*, Vol.72, No.717, (2006), pp.683-690.
- (4) 辰巳正和、荒井政大、筒井喜平、圧縮クリープ試験を用いた緩和弾性係数の同定法について、*日本計算数理工学論文集*, Vol.6, No.2, (2006), pp.137-142.