

レンズプレス成形シミュレーションのための光学ガラス物性測定

東京電機大学 ○井口直征, (国研)理化学研究所 山形豊, 東京電機大学 ©森田晋也

要旨

ガラスレンズはデジタルカメラ等の様々な分野に使われており、プレス成形は最適な成形条件を定めることが困難である。成形プロセスを正確にシミュレーションできる専用の有限要素法コードの開発が必要とされるガラス物性値の測定が必要だが、高温下での精度の確保が困難である。本研究では高温下で荷重を加え、変位の測定を行い、クリープ係数を算出した。非線形の Norton-Bailey 則に組み込んで定式化し、解析手法を提案した。

1. 研究背景

ガラスレンズは高性能なデジタルカメラ、ステレオカメラ、内視鏡など様々な分野において使用され、近年需要が高まっている。ガラスレンズの加工方法には様々な種類がある。切削はガラスが割れる欠点があり、加工を行うことができない。研削は加工に時間がかかり、切りくずが多い欠点があり、環境問題に悪影響がある。研磨は研磨剤の廃棄と加工速度が遅い欠点がある。特に研磨剤の廃棄は環境に悪影響がある。プレス成形は速度効率が高く、切りくずが出ない利点がある。欠点として高温下で行うため形状誤差が出る可能性があり、高精度の確保が困難である問題、金型が必要である問題が挙げられる。これらの問題点があるので、ガラスレンズの加工方法の多くはプレス加工で行われるが、ガラスを 400℃~900℃の高温でプレス成形する必要があり、かつ精度を求められるため、最適な成形条件を定めることが困難である。また、一般に市販されている装置は測定温度の上限が 300~400℃以下であるため、一般的な方法でガラスの熱粘弾性特性を高い精度で得ることは非常に困難である。そのため、複数回の試行錯誤によって成形条件の最適化が行われている^[1]。

2. 研究目的

ガラスの成形プロセスの最適化を行うことで効率化し、かつより高精度な成形を行うためには正確にシミュレーションできる専用の有限要素法コードの開発が必要であると考えられる。そこで、理化学研究所の VCAD システム研究プログラムの成果である V-Struct をベースとし、これにガラス物性モデル及び伝熱解析モデルを導入し、ガラス成形プロセスをシミュレーションできるコード V-Glace の開発が進められている。

V-Struct は静的陽解法を用いた主に金属の塑性加工をシミュレーションするために開発されたコードで、縮退 6 面体メッシュを使用可能とすることで、体積ロッキング現象を起こすことなく比較的大変形の塑性加工をシミュレーションすることが可能である^[1]。変形挙動をシミュレーションする上で応力に対するひずみ速度の応答のモデル化が必要であり、線形と非線形のどちらを用いても表すことができる。

3. ガラス物性のモデル化の手法の検討

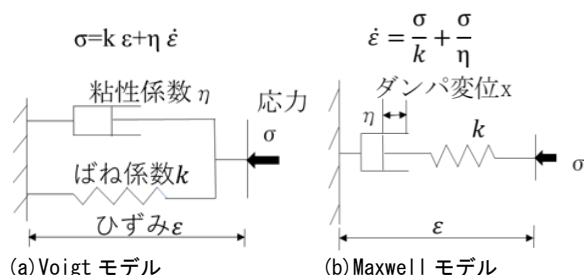


図1 線形モデル

σ に対する $\dot{\varepsilon}$ の応答を表すモデルとして、線形の Voigt、Maxwell (図 1)、非線形の Norton-Bailey 則がある。線形モデルは取り扱いやすいが、近似精度を上げるためには多段にする必要があり、計算量が増えるため時間がかかる。非線形モデルは計算が困難であるが少ない計算量であり、近似精度が高い。静的陽解法は非線形現象を表すのに適しているので本研究では非線形モデルの Norton-Bailey 則を用いる。Norton-Bailey 則は粘弾性の $\dot{\varepsilon}$ と σ の関係を表す次式

$$\dot{\varepsilon} = \alpha \sigma^\beta \cdot \cdot \cdot (1)$$

(クリープ係数 α , クリープ指数 β) で表され、式(1)は化学反応速度論に基づいた次式

$$\dot{\varepsilon} = \gamma \sigma^\beta \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \cdot \cdot \cdot (2)$$

で表され式(1)の α は温度 T に依存する。ここで、ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ [μ/s], 材料定数 γ , 応力 σ [MPa], 活性化エネルギー ΔH [J/mol], 気体定数 $R=8.31$ [J/mol·K], 絶対温度 T [K] とした^[2]。

ガラス成形プロセスのシミュレーションを行うためには様々な種類のガラス物性のパラメータを必要とする(表 1)。本研究では、ガラス材料試験機を使用して高温下で圧力と変位を測定し、Norton-Bailey 則を用いてクリープ係数を算出する。

表1 測定するパラメータ^[1]

パラメータ名	計測方法	温度依存性
クリープ係数	圧縮成形機	あり
弾性率	超音波法	あり
熱伝導率	レーザーフラッシュ法	あり
比熱・熱膨張率	示差熱分析装置	あり
密度	自動密度計	あり
構造緩和	屈折率計	なし
摩擦係数	リング圧縮試験機	なし

4. 実験方法

ガラス材料試験機を用いて試験片(ソーダガラス)を高温下で圧縮変形する(図 2)。一定荷重を加えた時の時間に対する変位が得られる。

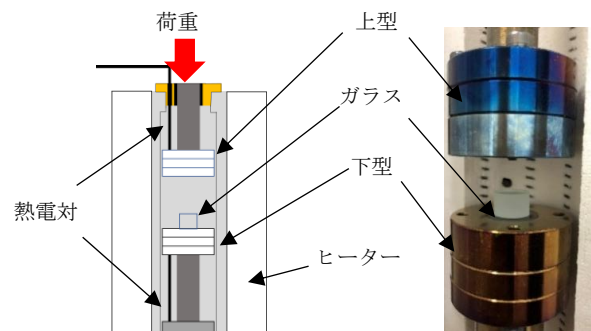


図2 クリープ係数同定のための圧縮成形装置

時間に対する変位を真応力に対する真ひずみ速度に変換し、各

温度の式(1)の α, β を算出する。本研究では、一定温度 640 °C、一定荷重 300 N の 1 回の 1 つの条件で解析を行い、一定温度 620, 640, 680 °C、一定荷重 100 N, 170 N, 300 N の合計 9 回の複数の条件の実験で解析を行った。解析した結果、他の条件では温度差が約 100 °C であったが、640 °C, 170 N の条件での実験のみ温度差が約 150 °C あったので外れ値として扱う。また 680 °C の条件での実験では原型を保てなくなる温度である屈伏点を超えたので外れ値として扱う。本研究では合計 5 つの実験データで解析を行った。

5. 解析手法

5.1 単一温度・荷重条件による α, β の同定

640 °C, 300 N の場合のソーダガラスの α, β はメーカにより測定されているため^[3]、本実験と比較する。クリープ変形時の変位を真ひずみと真応力に変換し微分して速度を求めるために平滑化スプラインを行う。平滑化した真ひずみを微分して真ひずみ速度に変換し、真応力に対する真ひずみ速度と非線形近似を行い、式(1)との係数比較から α, β を算出する。図3に示すようにフィッティングの結果 α, β が得られた。 α, β は参考値と比較すると精度が低い結果であるが、解析手法に関しては有効であるといえる(表2)。

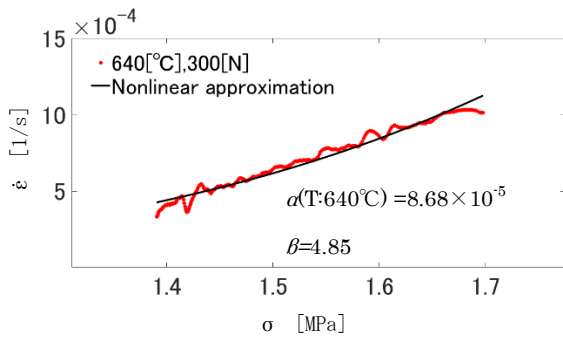


図3 σ と $\dot{\epsilon}$ の関係と非線形近似との比較

表2 単一条件での実験値と参考値の比較

物性定数	実験値	参考値 ^[3]
$\alpha(T:640^\circ\text{C})$	8.68×10^{-5}	2.97×10^{-9}
β	4.85	4.0

5.2 複数の温度・荷重条件による解析

式(2)両辺の対数をとると、

$$\ln \sigma = \frac{1}{\beta} \ln \dot{\epsilon} + \frac{\Delta H}{\beta R T} - \frac{1}{\beta} \ln \gamma \quad \dots (3)$$

となり、切片を C_0 、傾きを C_1 とする $\ln \dot{\epsilon}$ に対する $\ln \sigma$ の一次式となる。ただし

$$C_0 = \frac{\Delta H}{\beta R T} - \frac{1}{\beta} \ln \gamma \quad \dots (4)$$

$$C_1 = \frac{1}{\beta} \quad \dots (5)$$

となる。Tが一定の場合、荷重が異なるプロットは C_0 と C_1 が一致するため一直線上に並ぶ。Tが異なる場合は C_1 のみが一致するため温度毎のプロットは平行となる。各温度で線形近似を行い(図4)、係数比較により β を算出する(表3)。図4のように各温度の直線は平行にならなかったため、 β は5つの条件を線形近似の傾きを用いて算出した。

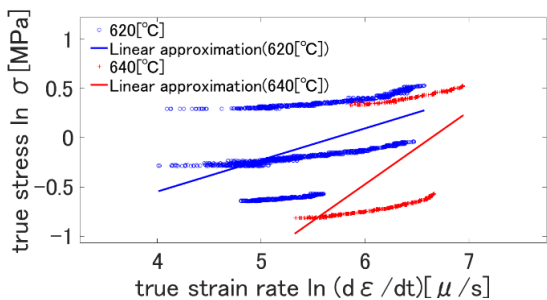


図4 各温度の線形近似による解析

表3 各温度の線形近似の傾き C_1 と切片 C_0

温度	傾き C_1	切片 C_0
620 °C	0.32	-1.83
640 °C	0.74	-4.92

C_0 は $1/T$ の一次式で表せるため線形近似を行い(図5)、式(4)との係数比較より傾きから $\Delta H/R$ 、切片から γ を算出する。式(1)と式(2)で係数比較を行い、 α を算出する(表4)。

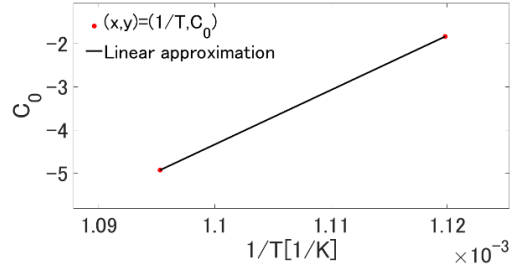


図5 温度の逆数に対する C_0 の線形近似

表4 複数の条件での実験値と参考値の比較

物性定数	実験値	参考値 ^[3]
α	2.59×10^{-717}	2.97×10^{-9}
β	5.88	4.0
$\Delta H/R$	7.41×10^5	
γ	5.73×10^{-366}	

理論式通りに各温度での荷重条件が一直線上で、各温度の直線が平行にならなかったため、各条件の C_1 と C_0 の比較を行った(表5)。

表5 各温度・荷重条件の線形近似の傾き C_1 と切片 C_0

温度 °C	荷重 N	傾き C_1	切片 C_0
620	100	0.09	-1.10
	170	0.12	-0.84
	300	0.11	-0.27
640	100	0.18	-1.83
	300	0.18	-0.77

6. 実験結果

実験値と参考値を比較した結果、精度が低い結果となった。これは上下の金型との温度差が原因であると考えられる。 C_1 が各温度で等しくならなかった原因として、ガラス材料試験機の入力である温度と荷重に原因があると考えた。640 °C の各荷重条件の C_1 は等しいので荷重による影響ではないと考えた。よって、理論上 β は温度依存性がないと考えられていたが、表5から温度依存性を持つと考える。620 °C で C_1 が異なる原因として、下型はソーダガラスの転移温度付近で加熱していたことが原因で試験片の内部の粘性に差が生じ、クリープ変形時に影響があったと考える。

7. 結言

以下に本研究の成果を示す。

- (1) Norton-Bailey 則に基づいた解析手法を提案した。
- (2) 9種類の異なる温度・荷重条件でソーダガラスを使用してクリープ試験を行った。
- (3) Norton-Bailey 則を用いた解析手法により物性値 $\alpha, \beta, \Delta H, \gamma$ を算出して定式化を行った。
- (4) 理論式通りに各温度での荷重条件が異なるプロットが一直線上に並ばず、温度毎のプロットが平行にならず、温度によるガラスの複雑な変形挙動を確認できた。

参考文献

[1] 山形他, 2018 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演文集(2018), 246-247.
 [2] H. Ito et al., J Solid. Mech. Mat. Eng, 1511-1519(2010).
 [3] 日本板硝子(株)により提供。