ガラスモールド物性計測に関する考察 ~体積弾性率と高温ヤング率の測定~

理化学研究所 山形豊

About V-Glace simulation code

- V-Glace glass press mold simulation code
 - Static explicit solver based on V-Struct with simultaneous thermal conductivity calculation
 - Hexahedral mesh capable of simulating large deformation
 - Creep constitution equation using Norton law with Arrhenius-type temperature extension
 - Deformable body contact simulation
 - Young's modulus, thermal conductivity, thermal expansion, specific heat, creep parameters and friction are considered
 - Fictive temperature calculation supported (parameter not implemented)

Advantage:

- Relatively stable over large press forming deformation
 Disadvantage:
- Requires relatively large computing power

Norton Law :

$$\dot{\varepsilon} = \gamma \ \sigma \ \beta_{\exp}(-\frac{\Delta H}{RT})$$

 $\dot{\epsilon}$:strain velocity, γ :constant, σ :stress, ΔH : activation energy, R: Gas constant, T: Absolute Temperature



Main GUI Interface of V-Glace

Mesh is generated by parametrized script to obtain "good" hexahedral mesh. Aspherical lens parameter can be used.

V-Glace(V-Struct)の計算原理

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面体メッシュを用いることで体積ロッキング現象を起こすことなく大変形のシ ミュレーションが可能である。静的陽解法は、線形の剛性方程式と同様のつり合い方程式を速度 計の弾塑性(V-Glaceでは粘弾性)構成式

$$\epsilon = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^p + \epsilon_{ij}^{cr} + \epsilon_{ij}^{TH}$$

(ϵ^{e} :弾性成分、 ϵ^{p} :塑性変形(現在未使用) ϵ^{cr} :クリープ成分 ϵ^{TH} :熱膨張) 弾性成分は、

$$\epsilon_{ij}^e = \frac{\sigma_{ij}}{E_{ij}}$$

のように単純な比例関係となっている。熱膨張は、ガラス転移による熱膨張率の変化を考慮して おり、クリープ成分は、ガラスの粘弾性を表現するため、ノートン則

$$\epsilon_{ij}^{cr} = \frac{3}{2}\sigma_{ij}'A\overline{\sigma^{n-1}}$$

を用いている。現状では、材料物性パラメータとして、クリープ成分(粘性)および熱膨張成分 はかなり正確に測定されているが、弾性成分の温度依存性は考慮されていない。

ISAAT2021 Niseko 2021 Nov.30- Dec.3

Examples of glass press mold simulation by V-Glace



Lens with flange from ball preform



Microlens Array



Meniscus Lens



Material parameters for the simulation

- Material parameters listed on the table are required for simulation.
- Most parameters are temperature dependent.
- Especially creep parameters and friction are difficult to measure using existing instruments.



Originally developed two-plate viscometer is used for measuring creep parameters.

Material parameters for V-Glace

Material Parameter	Measurement method	Temperature	
		dependence	
Young's modulus,	Ultrasonic method	Yes	
Poisson's ratio			
Thermal conductivity	Laser flash	Yes	
Coefficient of thermal	Thermal expansion	Yes	
expansion	measurement machine		
Density	Densitometer by electric	No	
	balance		
Specific heat	Differential Scanning	Yes	
_	calorimetry		
Creep parameters	Two-plate viscometer	Yes	
Friction	Ring compression method	Yes	
Structural relaxation	Densitometer	No	

Specification of two-plate viscometer

Parameter	Values
Max Press force	1,000N or 5,000N
Max temperature	900°C
Position	0.1mm
Resolution	
Sample size	φ15mm t=10mm
Test mode	Constant press force,
	constant press speed,
	sticking force measurement



Glass sample before and after creep test

ISAAT2021 Niseko 2021 Nov.30- Dec.3

Creep parameter analysis

Norton law is modified in linear form:

$$\ln \sigma = \frac{1}{\beta} \ln \epsilon + \frac{\Delta H}{\beta R} \frac{1}{T} - \frac{1}{\beta} \ln \gamma \dots (6)$$

parameters are identified by:

$$C_0 = \frac{\Delta H}{\beta R} \frac{1}{T} - \frac{1}{\beta} \ln \gamma \quad --- (7) \quad C_1 = \frac{1}{\beta} \quad ---(8)$$



Log data plot and Arrhenius plot for L-BAL42 and L-TIM28



ISAAT2021 Niseko 2021 Nov.30- Dec.3

Poster: P05

Friction coefficient measurement by ringcompression method







Glass press molding machine (Takeuchi Mfg. Ltd.)

Friction coefficient can be estimated from compression ratio (h/h_0) and shrink rate (d/d_0)



Friction coefficient is estimated to be 1 The simulation is based on soda-lime glass, so actual glass material parameter must be used.

ISAAT2021 Niseko 2021 Nov.30- Dec.3

Verifying simulation precision

- Constant velocity press experiments were conducted for three different glasses (OHARA L-BSL7, L-BAL42, L-TIM28) and compared with simulation results
- Press force magnitudes are almost same for three types of glass material, but speed of • press force decreases are not consistent. (Simulations are much slower)
- The reason may be due to gravity force that affect glass, mold and shaft in experiment, which is not considered in the simulation. In addition there is a play in the rotary joint beneath the load cell.
- Other precision verification such as profile accuracy, preform shape effect, shift of preform position etc are still in progress.



L-BSL7 590°C

L-BAL42 570°C

L-BAL42 567°C

小さいヤング率による体積収縮が課題

VCAD光学素子分科会研究会



• Norton-Baileyの式

$$= k\sigma^p$$
 V-Glaceで採用

• Soderberg

$$\dot{\epsilon} = c(e^{\frac{\sigma}{\sigma^+}} - 1)$$

Ė

Maxwell model







• Kelvin model

 $\sigma = R\epsilon + \eta \epsilon^{\cdot}$

σ: 応力、 ε: ひずみ R: ばね定数 η:粘性係数

Kelvin-Voigt model と書いてあ ることが多い。

Maxwell, Kelvin いずれのモデルも線形和であらわされるので、定式化 として取り扱い易いが、単一のモデルでは、応力応答、ひずみ応答を 正しく表現できないため、多段とする必要がある。

ESTIMATION OF THE RELAXATION MODULUS



Figure 1 Schematic of the creep test.

M.Arai, Y.Kato and T.Kodera, "Characterization of the Thermo-Viscoelastic Property of Glass and Numerical Simulation of the Press Molding of Glass Lens", J. Thermal Stress, 32,1235-1255, (2009)

Table 2 Test conditions of the creep test	Table 2	Test	conditions	of the	creep	tests
---	---------	------	------------	--------	-------	-------

Glass type		BK-7		TaF-3
Testing temperature [°C]	570	580, 590,, 620	630, 640,, 670	670, 680,, 720
Test piece diameter [mm]	6	10	12	10

実験装置は、電気炉内でガラスサ ンプルを一定圧力で加圧しつつ、 その変位を記録するという装置。

真ひずみを求めるため、サンプルの初期厚さL₀,厚さの変位をL(t)として、

$$\epsilon(t) = ln \frac{L(t)}{L_0}$$

を採用。真応力を求めるため、 断面積を

$$A(t) = A_0 \frac{L_0}{L(t)} = A_0^{-\epsilon}$$

で求めて使用している。

サンプル直径の記載はな いのだが、厚さは**10mm** と**12mm**を採用している 模様。

Experimental result



Figure 2 History of displacement for the creep test of TaF-3.

Figure 3 History of displacement for the creep test of BK-7.

	• BK-7	TaF-3
Glass transition temp. [°C]	572	680
Density [kg/m ³]	2510	4650
Young's modulus [GPa]	79.9	124.8
Poisson's ratio [GPa]	0.209	0.298

Table 1 Specifications of glass specimens

温度に応じたクリープ曲線が得られる。測定時間は結構長い(~2時間) サンプル厚さの半分ぐらいまで圧縮しているようだ。 温度範囲は、ガラス転移点~屈伏点の間あたりを4-5点ぐらい取っている。 2025/6/13

Maxwell modelでの近似

- ANSYS等の有限要素法に使用するため、Maxwell modelでの近似を実施。
- 3次までのMaxwell modelによるShear Relaxation modulusは、
- $G(t) = \sum_{i=1}^{3} G_i \exp\left(\frac{-t}{\lambda_i}\right) + G_{\infty}$ (18)
- とあらわされる。この式を先ほどのGでフィッ ティングして、パラメータを求めている。
- GOは、瞬間弾性率(非常に短い時間で変形させたの弾性率)で

G0=G1+G2+G3+G∞



Figure 13 Maxwell model for the relaxation modulus.

rur 5			
Coefficient [GPa]	G_1	G_2	G_3
BK-7	16.356	15.356	0.0412
TaF-3	11.897	35.691	0.4807
Relaxation time [s]	λ_1	λ_2	λ_3
BK-7	37.0	38.0	43.0
TaF-3	1.21	1.22	1.29

Table 4 Coefficients of the Maxwell model for BK-7 and $T_{2}E_{3}$

 Table 5 Coefficients of Maxwell model

Coefficient	G_0 [GPa]	G_{∞} [MPa]
BK- 7	33.04	0.201
TaF-3	48.07	0.201

高温でのヤング率の測定方法

- DMA
 - かなり高温まで測定可能だが、ガラスが軟化点以上の温度では困難
- 超音波法
 - ガラスが軟化点を超えてもおそらく縦波は使用可能なので、測定が できる可能性は高い
 - 装置がやや複雑
- 体積弾性率
 - 体積弾性率K, ヤング率E, ポアソン比vの間には、

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

 なる関係があるため軟化点以上でポアソン比=0.5と仮定すれば測定 は可能?

Dynamic Mechanical Analysis

- 材料に動的な変位(応力)を与えて、そのヤング率、損失を調べる方法
- $\sigma = \sigma_0 \sin(t\omega + \delta)$
- $\epsilon = \epsilon_0 \sin(t\omega)$
- 完全に弾性的材料
 σ(t) = Eε(t)
- 完全に粘性的材料
 - $\sigma(t) = K \frac{d\epsilon}{dt}$
- 実際にはこれらの中間になる。

ただし、DMA法でもガラスが軟化 してしまうとヤング率の測定結果 は信頼できない





写真1 DMS6100 の外観



Tg At SP

産総研北村先生によるL-BSL7の測定結果 VCAD光学素子分科会研究会

高温ヤング率の計測方法(案)

ニッケルのヤング率を音速を用いて測定した例

$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$
$$V_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

λ: ラーメの定数 μ:剛性率 ρ:密度 σ:ポアソ ン比、VL: 横波の音速、VT:縦波の音速

縦波と横波の速度が計測できないとヤング率を 求めることはできず、ガラスが軟化した状態で の測定は困難か?



Fig.1 Schematic diagram of the instrument S: Specimen, B:Buffer rod, T: Transducer, F: Furnace, TC: Thermo couple, W: Water jacket, FB: Fibre, CRT: Cathode ray tube, WN: Water supplier

高橋仙之助、山本英語、爾超音波法による高温におけるニッケルの男性定数の測定,*日本金属学会誌*37(4), (1973), p.373

体積弾性率からの計測

- 軟化点より上の温度ではガラスを液体とみなせば、ポアソン比=
 0.5
- 体積弾性率を高温で測定すれば、ヤング率の推定ができるのでは?



変位はかなり小さくなるので、別途変位センサーの増設が必要か? 圧縮力はロードセルで計測し、周期的な変動を与えることで計測可能? 2025/6/13 VCAD光学素子分科会研究会



- V-Glaceの現状の課題である高温におけるヤン グ率の計測について検討した。
- V-Glaceが採用しているNorton則モデルは、弾 性係数と粘性係数を独立して決定できるため、 よりリアルなガラスのシミュレーションが可能 となる可能性が高い。
- 一方で、ガラス転移点から軟化点までの間でヤング率を正確に測定することは現状では容易ではなく、今後も研究が必要。