ガラスのマイクロプレス成形に関する数値シミュレーション

Numerical simulation of micro press molding of glass

○小寺 力 (信州大院) 荒井 政大 (信州大) 伊藤 寛明 (信州大)
井野 友博 (信州大院) 安井 学 (神奈川県産業技術センター)

Tsutomu KODERA, Graduate Student, Shinshu University
Masahiro ARAI, Shinshu University, 4-17-1, Wakasato, Nagano City, Japan
Hiroaki ITO, Shinshu University, 4-17-1, Wakasato, Nagano City, Japan
Tomohiro INO, Graduate Student, Shinshu University
Manabu YASUI, Kanagawa Industrial Technology Center

Key Words: Glass micro press , Thermo-Viscoelasticity , Creep test , Finite element method

1. 緒 論

近年の光学分野の発展とともに、微細構造デバイスへの期待が高まっている。ガラスや樹脂の表面にマイクロ・ナノスケールの微細構造を付与することにより、これまでにない新たな光学特性の発現が期待できる。現在、微細パターンの製造方法として、リソグラフィを利用した半導体プロセスが一般的に用いられているが、製造工程が複雑であり、装置も高価である。また、単品生産となるため、コスト高である。これらの問題を解決する手法として、金型を用いた高温プレス成形が注目されている。高温プレス成形は、所望の形状に加工された金型形状をガラスや樹脂に転写させる技術であり、光学特性の優れたガラス材表面に溝形状やドット形状の周期構造を転写することにより、光通信用の光導波路やマイクロレンズアレイといった様々な用途の光学デバイスを、安価かつ容易に製造できる。

しかしながら、ガラスは応力とひずみの関係が時間と温度に依存する熱粘弾性体であるため、プレス成形により所望の形状を得ることは非常に困難である。また、成形温度や成形圧力、冷却時間など、考慮すべきパラメータが多く、実験により最適成形条件を探索することは多くのコストと労力が必要となる。

そこで本研究では、有限要素解析を用いてガラスのマイクロプレス成形の最適成形条件を評価することを目的としている。数値シミュレーションに先立ち、様々な温度環境下での一軸圧縮クリープ試験を実施し、ガラス材料の熱粘弾性特性の導出を行った。得られた熱粘弾性特性を用い矩形溝形状のマイクロ成形に関する数値シミュレーションを実施し、実際の成形試験結果との比較を行った。

2. 熱粘弾性特性

本研究では、ガラス材料を線形熱粘弾性体として取り扱う。一軸圧縮クリープ試験によりクリープ関数を求め、緩和弾性係数を導出した⁽¹⁾。なお、線形熱粘弾性体には、時間-温度換算則が成り立つことが知られている。この法則を用い、任意温度での緩和弾性係数を対数時間軸上で平行移動させることにより、基準温度での緩和弾性係数であるマスターカーブに一致させることができる。このときの平行移動量をシフトファクターと呼ぶ。本研究で用いた、ガラス材 D263 および PYREX の諸特性を Table 1 に示す。なお解析に用いるため、得られたマスターカーブを Fig.1 に示すような 3 要素 Maxwell モデルを用いて

Fig.1 Maxwell model

Table 1 Specification of the glass specimen

Material of glass	D263	PYREX
Glass transition temp. [°C]	557	560
Young's modulus [GPa]	72.9	65.6
Poisson's ratio	0.21	0.20
Coefficient of thermal expansion [μ/K]	7.2	3.2

Table 2 Coefficient of Maxwell model

Coefficient [GPa]	G_1	G_2	G_3	G_∞ [MPa]
D263	7.455	22.364	0.301	0.42
PYREX	6.750	6.750	13.770	0.41
Relaxation Time [Ms]	λ_1	λ_2	λ_3	
D263	0.44	0.47	0.54	
PYREX	0.48	0.52	0.58	

近似した。これにより得られた Maxwell モデルにおけるバネ定数 G_i および緩和時間 $\lambda_i = \eta_i / G_i$ を Table 2 に示す。

3. マイクロプレス成形

3.1 マイクロプレス成形試験 ガラス材料として、D263 および PYREX を用いてマイクロプレス成形試験を実施した。金型には、東海カーボン製のグラッシーカーボンをを用い、ダ

Fig.2 Forming sequence

Table 3 Testing condition of glass micro press

Glass Type	D263	PYREX
Temperature [°C]	580,600,610,620	630,640,650,660,670,680
Load [N]	700~800	700~800
Press time [sec.]	600	600

Fig.3 FEM model of glass micro press

イングにより溝幅 10[μm]、ピッチ 10[μm]、深さ 12[μm]、溝数 100 本のラインアンドスペースの加工を施した。プレス成形試験には、エンジニアリングシステム 製ホットエンボス装置 (ASHE0201) を用い、Fig.2 に示す成形シーケンスに従い、真空中にてプレス成形を行った。各種プレス成形条件を Table 3 に示す。なお冷却工程において強制冷却は行っており、上型を固定した状態において自然冷却を行っている。

3.2 数値解析 クリープ試験により得られた熱粘弾性特性を用いてマイクロプレス成形解析を実施した。本研究で用いた解析モデルを Fig.3 に示す。成形シーケンスは、プレス成形時と同様 (Fig.2) としたが、冷却工程については、金型を変位制御することにより金型とガラスの離型を行った。また、前節の成形試験に基づき、冷却速度を 0.155[°C/s] 一定とし、ガラス材が 25[°C] になるまで冷却を行った。

3.3 結果および考察 Fig.4 に成形高さに及ぼす成形温度の影響について実験値と解析値とを比較した図を示す。D263, PYREX のいずれも、温度が高くなるにつれて成形高さが増加した。ここで、本研究にて用いた 2 種類のガラス材料は、Table 1 に示すとおり非常に良く似た物性値を有している。しかしながら、成形結果を比較した場合、PYREX は D263 よりも成形温度を高く設定する必要があることがわかった。つまり、ガラスのマイクロプレスにおける成形条件は、単にガラス転移点などの物性値だけでは判断できず、熱粘弾性特性を考慮して決定する必要があるといえる。

Fig.4 Comparison between analytical value and experimental value

Fig.5 Comparison of shape of test pieces (D263)

次に、実験結果と解析結果との比較を行う。D263 については実験結果と解析結果はほぼ一致しており、解析が非常に高い精度で行われていることがわかる。Fig.5 に、D263 における成形後の溝断面形状および解析結果を示す。これより、各温度における断面形状に関しても実験結果と解析結果は高い精度で一致していることがわかる。

一方、PYREX においては、解析値が実験値を最大 5[μm] 程度下回っているが、成形温度と成形高さの関係は、ほぼ類似の傾向を示している。PYREX のプレス成形において、実験値と解析値とで差が確認された原因としては、クリープ試験時の温度環境の差が挙げられる。熱粘弾性特性の温度依存性により、数°C の温度差が解析結果に与える影響は小さくないと考えられる。つまり、実験における熱制御の精度を上げることによって、実験結果と解析結果の差は小さくなるものと考えられる。

文 献

- (1) 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, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.72, No.717, (2006), pp.683-690.