

リング圧縮試験によるガラスレンズシミュレーションの摩擦評価

東京電機大学 ○遠藤雅幸, (国研)理化学研究所 山形豊, 東京電機大学 ◎森田晋也

要旨

ガラスは融点が高いなどの特徴からレンズの設計・製作から成形条件の最適化に時間とコストがかかる。そのため有限要素法コードの開発が進められている。本研究では高温でのガラスの摩擦に着目し、高温のガラスの摩擦係数を推定できるリング圧縮試験を行うこととした。初めにシミュレーションの検証を行い、その後シミュレーションとリング圧縮試験を行い、実験ではソーダガラスの摩擦係数が1.0と推定することに成功した。

1. 研究背景

ガラスは融点が高く、高温でプレス成形する必要があり、成型後の形状誤差や内部応力によってガラスの破損や形状精度の低下、応力性複屈折の発生などの問題がある。現時点では高い精度を求めるための成形条件の最適化は難しく、多数回の試行錯誤によって最適条件の探索が行われているが、これらの問題の解決に成形シミュレーションが可能な有限要素法コードの開発が必要となる。

2. 研究目的

大変形の塑性加工シミュレーションは体積ロッキング現象を起こすため難しいとされている。本研究で扱う V-Glace^[1]は縮退6面体メッシュを使用することで体積ロッキング現象を起こすことなく塑性変形を行うことを可能とする。

塑性加工のシミュレーションにおいて摩擦係数は重要な数値となる。摩擦係数の測定方法の一つとしてピンオンディスク試験という回転するディスクにピンを押し当て、摩擦係数を測定する方法などがあるが、高温時には計測が難しい。リング圧縮試験は高温で成形を行うことができるため、本研究ではリング圧縮試験を用い高温のガラスの摩擦係数を推定する。よって

- (1)シミュレーションソフトが安定して計算を行うことを可能にする。
- (2)リング圧縮シミュレーションを行い、各圧下率の内径の減少率を求める。
- (3)リング圧縮試験を行い、シミュレーションの結果と比較を行うことで摩擦係数の推定を行う。

以上の3点を本研究の目的とする。

3. リング圧縮試験の実験方法

リング圧縮試験は金属材料の潤滑剤の評価で用いられており、^[2]その際にもシミュレーションで摩擦校正曲線を描くことは有限要素法プログラムを用いて行われている。成形シミュレーションソフトV-Glaceでは摩擦校正曲線を描いたことはなく、V-Glaceにおいて高温のガラスをリング圧縮シミュレーションを用い摩擦係数の測定手法を確立することで他の種類のガラスの摩擦を測定することが今後容易になると考える。

続いてリング圧縮試験の評価方法を説明する。リング圧縮試験は図1のようにリング試験片を金型で圧縮し、圧縮後のリングの圧下率と内径の減少率を測定し、各圧下率の内径の減少率をプロットし摩擦校正曲線を描くことで摩擦係数を推定することができる。ここで、 d :成形前のリング内径、 d' :成形後のリング内径、 h :成形前のリング高さ、 h' :成形後のリング高さ、 μ :摩擦係数とすると、下式によりリングの圧下率 R_h と内径の減少率 D_d を算出し摩擦係数 μ を推定する。

$$R_h = (h - h')/h \times 100(\%) \cdots (1)$$

$$D_d = (d - d')/d \times 100(\%) \cdots (2)$$

摩擦係数がある値より小さい場合、リングの内径が広がるため、 $d < d'$ となる。摩擦係数が大きくなると、リングの内径は高さの減少に伴い減少するため、 $d > d'$ となる(図1)。

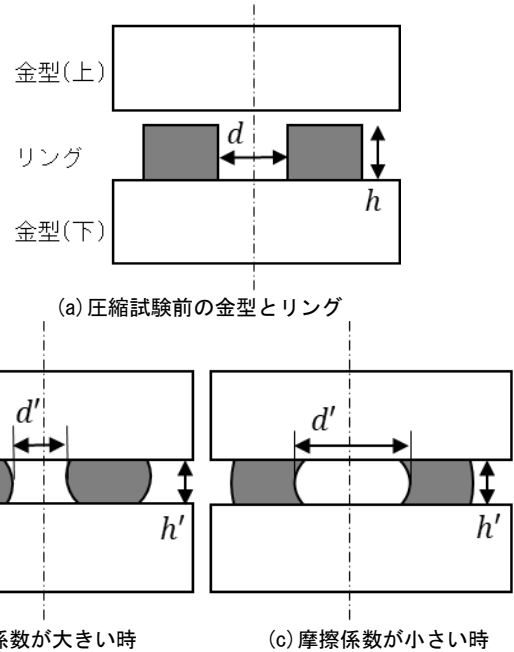


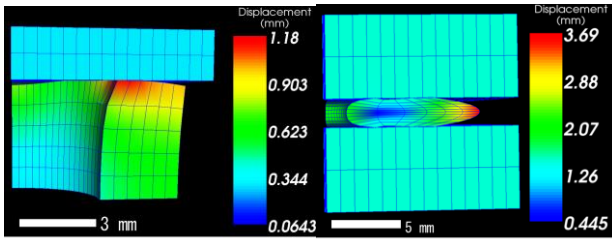
図1 リング圧縮試験による摩擦係数の推定法

3.1 成形シミュレーションの機能評価

まず摩擦係数 μ を0.1~5.0と定め、リング圧縮の計算が破綻せずに行われているかを確認することで、成形シミュレーションの計算安定性について検証した。成形シミュレーションは摩擦係数と接触摩擦パラメータを設定し行う。リングはソーダガラスを用いた。

接触摩擦パラメータはシミュレーション上でガラスの静止摩擦状態の間の滑りを阻止するための仮想的な力を決めるゲインとなる。リング圧縮試験を行う際、金型とリングの間には摩擦が発生するが、リングは最大摩擦係数を越えるまで静止する。接触摩擦パラメータで生成される力は、最大静摩擦係数を越えるまでにリングが静止するために拘束しておく仮想的な力となる。この値は最適な条件を探索するために、何度かシミュレーションを行う必要がある。

接触摩擦パラメータを50とした結果、 $\mu = 0.1 \sim 1.0$ では安定して計算できたが、 $\mu = 3.0$ では計算が安定せず接触後に進行が極端に遅くなり圧下量が0.3 mmでシミュレーションが終了した。これは計算のステップ幅が小さいまま進行してしまったと考えられる。そこでモデルの境界条件とメッシュ数を変更し、接触摩擦パラメータを100,000として再びシミュレーションを行ったところ、すべての条件で安定して計算を行うことができたため、図2に示す。



(a) 改良前 (b) 改良後
図2 リング圧縮変形計算の安定性向上 (摩擦係数 3.0)

以下ではこの条件で使うこととした。

3.1 リング圧縮シミュレーションによる摩擦校正曲線の算出

リング圧縮シミュレーションにより内径の減少率を求めた。リング圧縮シミュレーションにおいて摩擦係数毎の各圧下率の内径の減少率を求め、摩擦校正曲線を描く。表2に圧縮前のリングの寸法とリング圧縮シミュレーションの実験条件を示す。摩擦係数は0.1~1.0を設定し、シミュレーションを行った。

表2 圧縮前のリングの寸法とリング圧縮シミュレーションの実験条件

リングの材料	ソーダガラス	
設定温度	680 °C	
リングの寸法	外径	15 mm
	内径 d	7.5 mm
	高さ h	5 mm
圧下量	3 mm	

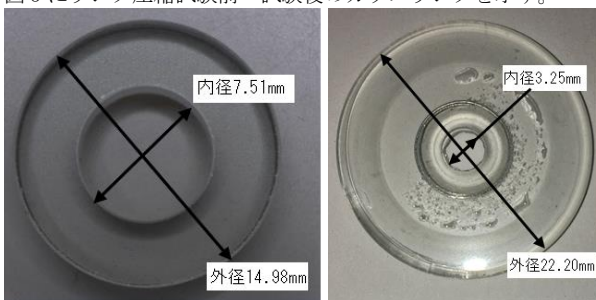
3.2 リング圧縮試験による摩擦係数の推定

表3にリング圧縮試験の実験条件を示す。

表3 リング圧縮試験の実験条件

リングの材料	ソーダガラス	
金型の材料	超硬合金 DLC コーティング	
設定温度	640 °C	
成形前のリングの寸法	外径	14.98 mm
	内径 d	7.51 mm
	高さ h	4.74 mm
圧下量	2 mm	

図3にリング圧縮試験前・試験後のガラスリングを示す。



(a) 圧縮前 (b) 圧縮後
図3 リング圧縮試験前・試験後のガラスリング

圧下量は2.99 mmとなり、圧下率は63%、内径の減少率は56.7%となった。これは下の金型が成型時の温度が640 °Cの際、上の金型が最高で779 °Cとなったためだと考えられる。ソーダガラスのガラス転移温度は550 °C、軟化温度は720 °C~730 °Cとなる^[3]。上の金型は軟化温度に達し、溶けたため圧下量が多くなったと考えられる。また図3よりリングに空気が入ったため、改善として真空中で成型を行う試験機を使う必要があることが分かった。

3.3 リング圧縮シミュレーションによる摩擦校正曲線とリング圧縮試験の実験結果比較

図4にリング圧縮シミュレーションの摩擦校正曲線とソーダガラスの摩擦係数の算出グラフを示す。

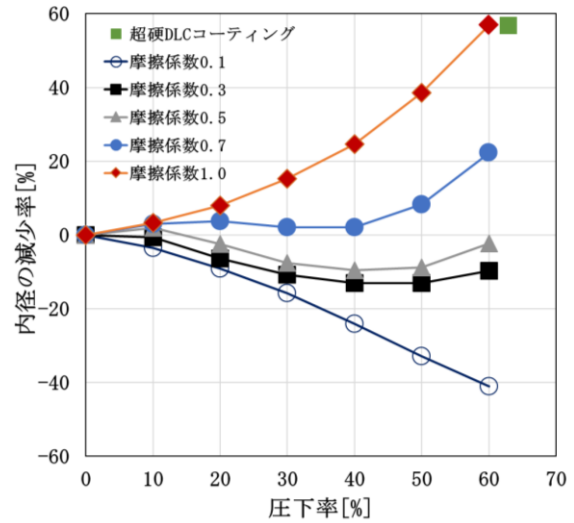


図4 リング圧縮シミュレーションの摩擦校正曲線とソーダガラスの摩擦係数の算出グラフ

リング圧縮シミュレーションを行い、描いた摩擦校正曲線とリング圧縮試験の実験結果から摩擦係数が1.0と推定することができた。

4. まとめ

成形シミュレーションを改良し、安定した計算でシミュレーションを行うことができた。改良後にリング圧縮シミュレーションを行い、摩擦校正曲線を描いた。摩擦校正曲線とリング圧縮試験の結果を比較しソーダガラスとDLCコーティングを施した超硬合金型間の摩擦係数を1.0と推定することに成功した。

5. 今後の展望

リング圧縮試験において成形後のリングに空気が入ることや上下の金型の温度差などの課題があった。これらの問題については真空中で成型を行う成型機を用いる必要がある。また、本研究ではリングにソーダガラスを用いたが、これは窓ガラスや板ガラスなどに使われている。成形シミュレーションにおいてはガラスの種類を変え、光学用ガラスのBK-7や石英ガラス、ホウケイ酸ガラスなどを用い、同じ条件で試験を行うことで、汎用性が高まっていくと考えられる。

参考文献

[1] 山形他, 精密工学会秋季学術講演会講演論文集, (2018), p. 247
 [2] T. Altan et al., Trans. ASME, (1972) p. 775-782
 [3] 三芝硝材(株), 「ソーダ石灰ガラスの熱的性質」,
https://www.sanshiba-g.co.jp/column/kisochisiki/post_4.html