

精密プレスシミュレーション技術

三津江金型株式会社 技術開発室

福田 達也

The application of the simulation technology to the precision press

Tatsuya Fukuda

Research and Development department Mitsue Mold Engineering Co., Ltd.

1. はじめに

近年、デジタルカメラの高画素化などに対応して、ガラス製光学素子に注目が集まっている。それは、樹脂製のそれに比して、ガラスが耐候性や光学特性に優れるからである。そして、これらガラス製光学素子の量産では、通常、「ガラスモールドプレス」と呼ばれる等温プレス方法が採用されている。これは、(特に)冷却時の金型温度とガラス温度をほぼ均一に保つことにより、ガラス内部の温度勾配を最小化し、もって高精度な形状転写性を実現する優れたプレス方法である。⁽¹⁾

しかし、光学素子に要求される精度がますますシビアになってきている今日、以下の問題点を内包しており、成形システムとプレスシミュレーション双方からの改善アプローチが不可欠である。

課題の第一は、許容しがたい「ひけ」の発生があり、どうしても試験成形—金型形状補正加工というサイクルが排除できないことである。この「ひけ」発生の原因は後述することとする。

第二は、特殊なメニスカスレンズにおける成形時のガラスの引っ付き(金型の抱きこみ)、コバ部分のわれなどが発生し、成形条件の決定に時間を要することである。これらの課題はいずれも製品の市場への投入の遅れやコスト高などの問題につながっていく。

一方、通常、モールドプレスで成形したレンズは、成形前のよく管理されたプリフォーム状態のガラスに対して、 10^{-3} レベルの屈折率変化が生じる。こうした屈折率変化や内部での屈折率のばらつき、残留応力による複屈折などは、後述するようにガラスの冷却過程での内部温度勾配をできるだけ最小に抑制することで小さくできる。図2にその例を示す。(一部特定形状の残留応力はそうした冷却速度調整だけでは消し去ることはできない。この点に関しても後述することとする。)しかし、ワンサイクルあたりの時間をいわずに延ばすことは、経済的観点から不適切であり、サイクルタイムとこれら光学性能とはいわばトレードオフの関係が存在する。

そこで、最適な条件を探ることとなるが、これもまた膨大な時間がかかり、先述同様の問題に結びつく。

したがって、こうしたトライアンドエラーの回数を低減し、短期間での製品市場投入に資する目的、製品の良品率を向上させる目的から、

R & Dセンター
〒594-1144 大阪府和泉市テクノステージ 3-1-11
大阪府いずみテクノサポートセンター RF 108
TEL 0725-51-2311
FAX 0725-51-2386
Email: fukuda@mitue.co.jp

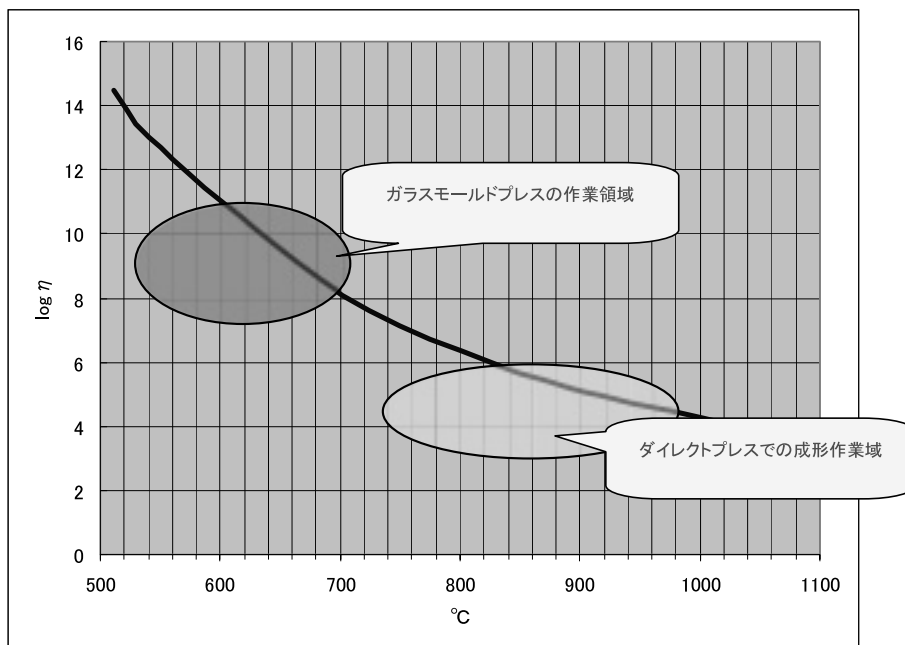


図1 各プレス工法での作業粘度領域



徐冷速度1deg/sec

徐冷速度4deg/sec

徐冷なし6deg/sec

図2 冷却速度によるひずみ量（鋭敏色板法による）

成形シミュレーションが注目されている。

2. 非球面レンズの超精密プレス技術

まず、非球面レンズ成形に用いられている等温成形法に関して概観する。そもそもこの工法は、イーストマンコダックが、70年代後半に開発、80年代初頭にプレス非球面レンズを搭載したカメラを世に出したことが始まりであるとされる。

以降、各社各様に成形システムやプリフォームが工夫、改良されてきたが、基本となる原理

は不変である。

プロセスは以下である。まず、バルク上のガラスをプレスに適する形状に加工したものを用意する。次に、金型にこのガラスを投入し、同時に過熱し加圧する。ガラス転移点以下まで、金型とガラスを同時に徐冷する。

ところで、ブラウン管ガラスのプレスのように、溶融ゴブをダイレクトにプレスする方法とこの手法の大きな違いは、ガラス成形時の粘度にある。図1に、そのイメージを示す。通常のダイレクトプレスでは、 $\text{Log}\eta = 7.65(P)$ 以下

で成形を終えるのが普通である。対して、モールドプレスでは、 $\text{Log}\eta = 8$ (P) 程度から転移点近傍までの間で成形する。

すなわち、この工法の特徴は①CTE が大きく変化する TG までを加圧保持することで、形状転写性を上げ、②また、金型と同時にこの温度まで徐冷することで、残留ひずみを最小化する・ことにある。

この工法はダイレクトプレスでは実現できない高精度な形状転写を実現するにとどまらず、他の非球面レンズ作成方法と比して、大幅な工程短縮になり、量産化が展望できる技術である。ここで、成形後のアニールであるが、一般には、アニールせずに用いられることが多い。(特に携帯用レンズなどはほとんどアニールレスである) これは、この手法が、ダイレクトプレスなどに比べて、ガラス内部の残留応力が小さく、光学的な欠陥が少なくなるからである。

3. シミュレーション手法

筆者らは通常、FEM を用いて解析している。大変形やコンタクト機能に対応し、連成(変形—熱伝導)解析のできる非線形コードであれば、(サブルーチンの作りこみを前提として) 計算は可能である。

ガラスの材料モデルとしては、変形の時間依存性、温度依存性をどう取り扱うかによる。そしてそれはまた、そうしたガラスの粘弾(塑)性的性質をどう試験で取得するか試験方法にもよる。

一般的には、一軸荷重のクリープ試験などで取得したデータを持って、一般化マックスウェルモデルの各係数を同定していく手法をとる。(熱粘弾性モデル) この手順は以下である。⁽²⁾

粘弾性材料の場合、現象論的モデルとして、よく一般化 Maxwell Model が使われ、議論される。すなわち、複数のばね&ダッシュポットを持った各緩和時間を有するこうした径を複数連ね、各要素の係数、弾性率の緩和に対応する係数、緩和速度に対応する係数を求め(同定す

る)る。

そこで、まずクリープ試験機を用いた一定温度下での緩和弾性率取得を行う。すなわち、クリープ試験により、緩和のマスターカーブを非線形フィッティングにより行う。荒井氏らの方法では、実験により得られたクリープ関数をべき関数で近似。緩和弾性率 $k(t)$ をえる。

次に、温度によるシフトパラメータを同定し、熱粘弾性モデルの材料定数を用意する。この際、次の Narayanaswamy の式を用いて活性化エネルギー ΔH をグラフよりもとめることにより任意の温度におけるシフトファクターを求める。

$$\text{In}\alpha T_0(T) = \frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)$$

ここで、 R は気体定数、 T_0 は基準温度、粘性流動速度の活性化エネルギー ΔH により、シフトファクター αT_0 を定義するのである。

最後に一般化マックスウェルモデルにおいて、緩和弾性率 $k(t)$ を以下のようにおき、係数同定を行う。

$$k(t) = \sum_{i=1}^N k_i \exp\left(\frac{-t}{\lambda_i}\right) + k_\infty$$

ちなみに、 k_∞ は、無限時間経過後の弾性率である。

これら各係数を準備し、解析コードに渡してやることで、(また、温度によるシフトファクターを定義してやることで) 熱粘弾性モデルを採用することができる。

4. 解析事例

図3は、メニスカスレンズをプレス成形した際の冷却時ガラス内部温度勾配と、成形後のレンズに存在する最大主応力を計算例である。メニスカスレンズの成形の場合、通常の両凸レンズなどと違った独特の形状変化が起こる。⁽³⁾⁽⁴⁾ また、レンズ凹側が金型と引っ付き(抱き込み)離型時に不具合が発生するなどの問題がある。

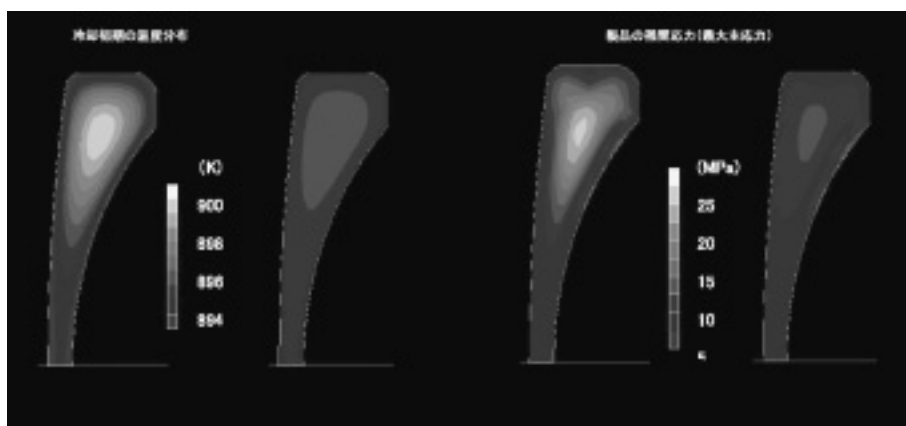


図3 冷却中の温度場と最終状態での最大主応力（いずれも左が8 deg/sec，右が2 deg/secの冷却速度

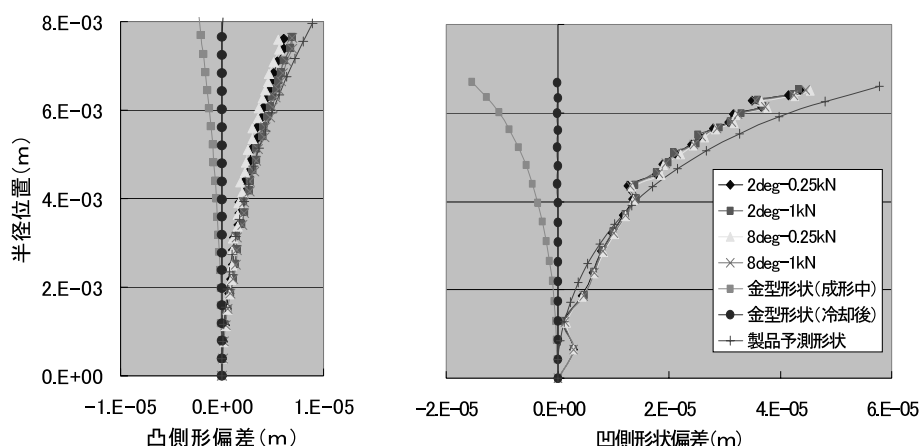


図4 計算によるメニスカスレンズの形状予測（左が凸，右が凹側）

さらには、レンズの凹側内部に大きな応力が残留し、光学性能を劣化させるなど、光学的な問題もある。

計算で判明したことは、内部の残留応力の大きさは、冷却速度，すなわち，冷却時のガラス内部の温度勾配の大きさに依存していること，また，レンズ凹面の外周付近の大きな応力は，そうした冷却速度の調整だけでは軽減できない（速度を小さくしても，残留応力の大きさはそれほど小さくならない）ことである。これは冷却時ガラスの収縮が金型によって部分的に拘束されることによって生じる応力であり，金型の材質（膨張係数），金型表面状態，離型時の金型温度などを変えるとその結果が変わることがわ

かった。

さらに形状を算出してみると，図4のようになり，レンズ凹面外周部の残留応力に対応して収縮が拘束された結果，Rがやや大きくなる傾向がわかる。このことは，先述の論文に記述された形状に関する結果と定性的には一致する。

次に，図5に示したものは，コバつきの平凸レンズの計算事例である。ここで示しているものは，先述のメニスカス同様，冷却中の内部温度分布と結果としての残留応力（相当応力）の大きさである。これらは徐冷温度を通常の数倍に上げたものなので，現実よりもかなり大きく応力が出ている。実際の成形時のように，0.5度/sec程度の冷却速度にすると，最大部分

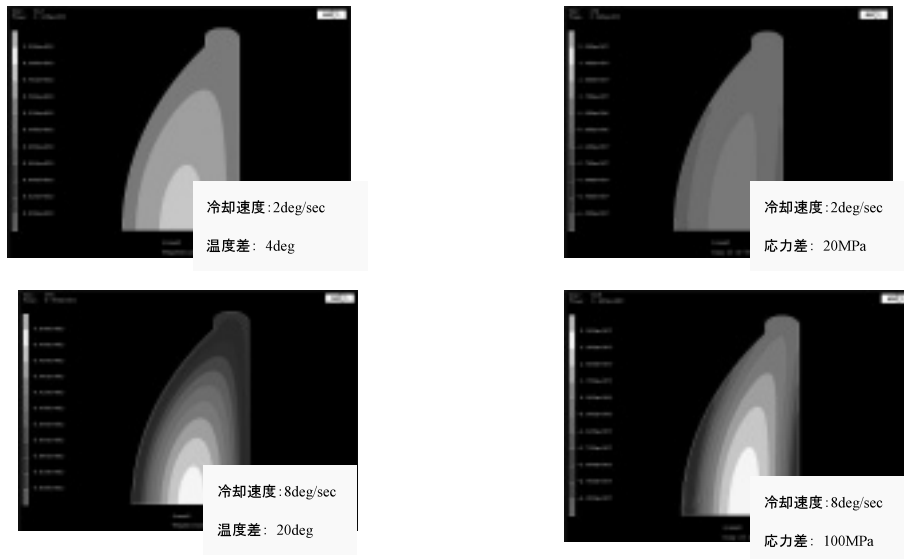


図5 平凸レンズのプレス解析（左が冷却中の温度場，右が最終状態での相当応力）

で、4 ないし 6 MPa の値となった。

こうした平凸ないしは両凸レンズの場合は、残留応力の大きさを決めるのは、冷却時のガラス内部の温度分布であり、それゆえに、大変形を施す温度から除荷するまでの間の冷却速度を適切に制御することが肝要であることがわかる。ただ、注意を要する点は、この事例のように、コバを有する形状のレンズの場合、冷却途中に最大の応力値を示すのは、コバと製品面のつながりの部分であることが多い。（あくまで一般論であり、レンズ曲率の大きさやコバ形状によるので、個々計算してみなければわからない）通常、われ防止のためにこの部分に微小な R が挿入される理由はこのためである。当然挿入される R の大きさによって、応力は変わる。

さいごに、前節で述べた付着応力の影響に関して紹介する。ここでは、比較的高い温度で、金型をデッドにし、冷却による自然剥離をうながし、結果として成型品の形状がどう変わるかを見た。図 6 にその結果を示す。実験結果が示すとおり、「最高温度」すなわち、剥離開始温度が高いほど一様収縮からの乖離（いわゆる「ひけ」）が大きいことがわかる。この事例では BK7 を用いたプレスを行っているが、最大温度を

軟化点に近づけていくとある温度で急速に、不均一収縮量が大きくなり、形状が変化することがわかる。

このことは、旭硝子中央研究所のレポート⁽⁵⁾の指摘と照合する。同レポートでは、金型とガラスの界面温度こそが付着応力を決定していること・その付着応力は、軟化点に近づくと急速に大きくなることを実験結果から論じている。

我々も同様の実験を行い、付着応力の温度依存性を確かめた。我々は、恒温で、かつ酸素濃度を管理したチャンバーを設けた装置を作成し、引張り試験機内に設置、円柱状のガラスを用いて、以下の実験を行った。

円柱下部をホールドする。上部に超硬の平板を設け、炉内で、所望の温度 T_1 に保った上で、ガラス円柱を押し上げ上部平板に押し当てる。このまま接触を保持しながら（剥離しない程度の荷重を加える） T_2 まで冷却し、一定速度で、円柱を下げ、剥離時に発生する力を測るというものである。

さて、これら実験の結果と、先に示した冷却剥離時の温度による形状の変化が示すものは、以下である。すなわち、①レンズの最終形状に与える付着応力の影響は大きい。②付着応力は

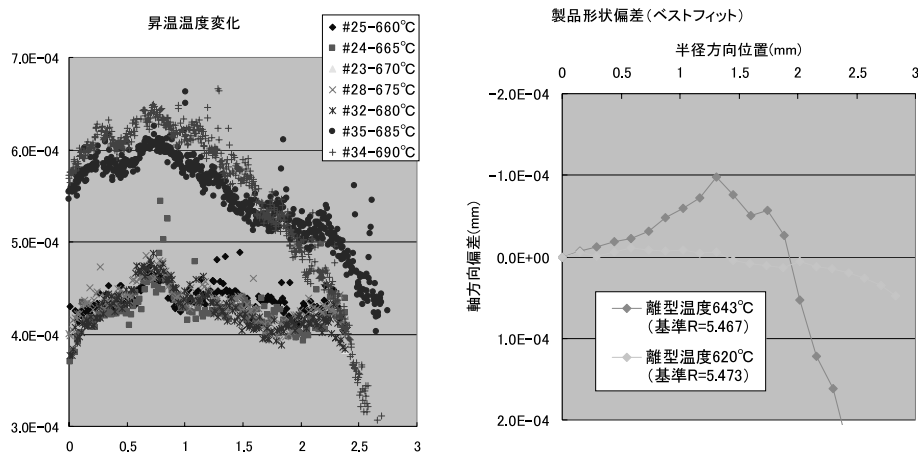


図6 平凸レンズの成形実験結果(左)とシミュレーション結果(右)

温度に依存する。それゆえ、③形状を予測するためには、付着応力の温度依存性を考慮した計算が必要である。

この観点を踏まえ、図6をご覧ください。右に示すものは、そうした考慮を行い計算した形状予測の計算結果である。左の実験の実験結果を定性的な一致を見ることがわかる。

5. シミュレーション高度化の課題

シミュレーションに期待されることは、成形条件やプリフォーム形状の最適化、それに先述の形状偏差の予測(金型設計にフィードバックしてのトライ回数低減)にとどまらない。

その1つが、光学性能予測である。既に述べたように、モールド成形されたレンズは、プレス後アニールせずに使用する場合が多い。したがって、通常、モールド成形したレンズの屈折率は、プリフォームのそれに比して小さい値となっていることが多い。これは、経済的な時間内に所望の温度に冷却されるため、ガラスの仮想温度がプレス前のそれと異なるようになるからである。⁽⁶⁾

こうした仮想温度の変化(それは密度など、仮想温度に関係付けられるガラスの性質につながる)を算出することは、構造緩和現象の解析を行うことに他ならない。そしてそれは、先述の変形—熱伝導解析と連成させることに意味が

ある。構造緩和は体積ひずみを生じるので、変形に、また、熱境界が変化するので熱伝達—伝導に影響を及ぼし、また同時に、これら変化から、構造緩和の駆動力たる温度変化がもたらされるからである。

こうした現象の解析では、先述の粘弾性モデルでの緩和時間と比してはるかに大きい緩和時間を有する、多成分のマックスウェルモデルを用いて計算できる。事実、大型平面ガラス体積ひずみの算出や、ブラウン管ガラスのクエンチング時の応力場解析などで、この考えは実践されている。⁽⁷⁾

我々は、種々の光学ガラスの構造緩和特性取得の手法開発とともに、上記解析の高度化を追及している。

6. おわりに

文中で触れたように、レンズの形状や光学特性、また、成形条件に影響を与える因子は数多い。したがって、本来の目的である「高精度なガラス素子生産の効率化」を達成するためには、硝材、金型素材、その表面処理技術、成形システムなど、各要素技術との能動的なやり取りが必要であると考え。

我々は今、そうした観点から、産官学のコンソーシアムを組んで、開発に取り組んでいる。精密金型の設計製作、表面の処理技術というコ

アの技術を踏まえて、さらに広範囲な知見を吸収することで、ガラス産業に貢献できる技術が提供できれば幸いである。

参考文献

- 1) たとえば <http://www.sumita-opt.co.jp/ja/goods/pick/hikyumen.htm>
- 2) 計算数理工学論文集 Vol. 5, No. 2 (2005 年 12 月), 論文 No.14-051209
- 3) Proceedings of the XX ICG in Kyoto, Sep.27th–Oct. 1st (2004), P-04-026
- 4) Proceedings of the XX ICG in Kyoto, Sep.27th–Oct. 1st (2004), P-04-025
- 5) Reports Res. Lab. Asahi Glass Co.Ltd., 53 (2003)
- 6) O. S. Narayanaswamy : J. Am. Ceram. Soc., 54, 491–498 (1971)
- 7) Reports Res. Lab. Asahi Glass Co., Ltd., 55 (2005)