樹脂レンズ射出成形工程の保圧力制御に関する実験的考察*

曾根 順治^{*1}, 村田 弘^{*2}, 高木 章二^{*3}Experimental Results of Molding Pressure Control
on Injection Molding Process of Plastic Lenses

Junji SONE, Hiroshi MURATA and Shoji TAKAGI

Pressure control of the holding process in injection molding should be executed in such a manner as to minimize the variance of specific volume, since plastic lenses shrink greatly in holding processes and any distortion caused by shrinkage should be compensated by pressure control. In this report, we introduce a developed holding pressure I-P control system that has a nozzle pressure feedback mechanism. We designed three versions of the holding pressure control system and applied them to the plastic lens molding. We have shown experimentally that constant specific volume pressure control improves the dimensional accuracy and reduces strain in injection molding of thick molded parts. Of the three versions of the holding pressure control system, that involving average temperature control realizes the greatest improvement of shape accuracy and birefringence.

Key Words: Injection Molding, State Transition of Plastics, Holding Pressure Control, Plastic Lens, Shape Accuracy, Strain

1 まえがき

射出成形は金型内に溶融樹脂を注入し製品を形成する加工であり、金型形状を成形品に正確に転写[1]させる必要がある。この成形法において、ゲート数が限られるため、成形品内の圧力分布を均一にすることは難しい。また、一般的な形状の場合、成形品内の温度分布を測定することは難しく、その温度分布を制御することも難しい。これらの拘束条件の中、高精度をめざした射出成形加工法が研究されている。型内圧力フィードバック制御法[2]は、必要以上の樹脂圧縮を防ぐために金型内の圧力をフィードバックすることにより型内の最大圧力の上昇を押さえている。適応制御法[3]は、充填時間を計測して保圧力を調整することにより金型内の最大圧力を一定に制御し、成形品の重量ばらつきを減少させている。アーヘン工科大のPVT制御法は、良成形品の得られたゲートシール点(温度と圧力の関係値)を保つために、成形品の温度を計測し、ゲート封鎖時間の制御を行うものである。丸山ら[4]は、異なる温度の冷却水を切り替えて金型に用い、成形品の温度分布を減少させる方法である。また、成形品内の温度を均一にするため冷却速度を遅くしたゲートシール法[5]、冷却過程にキャビティを圧縮してひけを防止する射出圧縮法[2]なども開発されている。これらの研究は、保圧

力曲線の形状設計については言及していない。

本研究で対象とする樹脂レンズの成形においては、保圧・冷却過程が通常成形と比較して特に重要である。なぜならば、太く短いランナを用い、ノズル圧力が成形品に伝わり易く、金型温度も樹脂のガラス転移点に近く、保圧冷却時間が長いためである。保圧・冷却過程において、金型の温度制御法を適用すると成形品内の温度差を減らすことはできるが、中小型のレンズの場合には成形サイクルが長くなる。特に、保圧過程では、大部分の状態がガラス転移点(T_g)以上の溶融状態であるため、温度変化に伴う比容積の変化も大きい。この比容積の変化を小さくすればする程、残留する歪みを低く押さえられると考えられる。従来の成形法において、保圧力曲線は、試行錯誤により、階段状に設定されている。実際の圧力値と設定された圧力値の誤差をフィードバックすることにより、製品のばらつきを押さえることはできる。しかし、より精度の高い製品を得るには、妥当な保圧力曲線を求めることが重要と考えられる。

本報告では、保圧過程が成形品の精度に大きく影響する肉厚の樹脂レンズにターゲットを絞り、従来の成形方法にノズル圧力フィードバック機能を設け、保圧力曲線をPVT曲線と成形品の代表温度から求める手法を提案する。

2 圧力制御手法

本研究では、金型温度を一定に保ち、ノズルより一定温度の溶融樹脂を金型に射出する成形を対象とする。この際、金型へ樹脂充填後、ノズル部の樹脂圧力を制御することにより、成形品の残留ひずみを可能な限り小さくすることを目的とする。本節では、望ましいノズル部での圧力の目標値(以後、保

* 原稿受付 1996年9月18日。

*¹ 正員, (株)東芝生産技術研究所 (〒235 横浜市磯子区新磯子町33)。*² (株)東京電気生産技術本部 (〒101 東京都千代田区神田1-14-10)。*³ 正員, 豊橋技術科学大学工学部 (〒441 豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘1-1)。

圧力曲線と呼ぶ)を決定する方法および圧力制御システムの構成について述べる。

2.1 成形過程における樹脂の状態

図1にアクリル樹脂の圧力-比容積-温度の関係を表す状態(PVT)曲線を示す。一般的な非晶性樹脂は図1の形となる。以下に成形過程における型内のある点の樹脂の状態について、定性的に述べる。図中の1-2は射出過程、2-3は保圧過程、3-4は型内での冷却過程、4-5は型外での冷却過程である。図より、樹脂の比容積値は圧力と温度に大きく影響されることがわかる。特にガラス転移点(図中の曲線 T_g 上の点)以上の温度において、一定の圧力下における比容積値の変化は大きい。この原因として、固化状態の樹脂の分子運動量は溶融状態の分子運動量と比較して減少するため、比容積が変化すると考える。溶融状態からガラス状態に移る過程で、型近傍からガラス化が始まる。外部から圧力を加えて樹脂を供給しないとひけが生じるため、保圧する必要がある。また、保圧過程において、ガラス化している金型近傍に保圧力による歪が残留する。特に、保圧過程が長い厚肉成形品の場合、保圧過程での適切な圧力制御が必要となる。

2.2 保圧力曲線の設計

保圧過程において、金型内成形品には温度分布が生じるので、同成形品の比容積は分布を持つ。ノズル部の圧力のみを操作する本研究の場合には、この比容積分布を望ましい状態に制御することは困難である。そこで、まず、熱伝導解析により金型内成形品温度分布の時間的推移を求め、その結果に

に基づき空間平均的にみて妥当な代表温度の時間的推移(以後、代表温度と呼ぶ)を決定する。次に、金型内成形品の空間平均的比容積値を仮定し、代表温度曲線を考慮してPVT曲線より圧力の時間推移を決定する。太く短いランナを用いる厚肉樹脂レンズを成形する本研究の場合には、保圧過程において、ゲート部近傍を含む金型内成形品は溶融状態にあると考えるので上記のように求めた圧力曲線を保圧力曲線として採用することができる。以下、保圧力曲線を決定する方法の詳細および空間平均的比容積の決定法について述べる。なお、対象とする成形品を、図2に示す両面球面のプラスチックレンズとする。

2.2.1 成形品の温度分布と代表温度曲線

樹脂の温度変化は熱伝導が主体的に影響すると仮定し、金型内成形品温度の時間変化を伝熱数値解析から求める。本研究では汎用解析ソフトを用いて、有限要素法による非線形・非定常の熱伝導解析を行った。下記に解析条件を示す。

- (1) 成形品の冷却には金型外形の影響より冷却管の影響の方が大きいと仮定し、直方体金型を軸対称形状にモデル化する。解析モデルは図3に示すように、レンズを金型中央に配置し、2本の冷却管を配置するものとした。要素数はレンズで40個、金型で232個である。境界条件は実測値を考慮して図3に示すものを用いた。

Fig. 1 PVT diagrams of PMMA and molding process

Fig. 2 Schematic of spherical plastic lens

Fig. 3 FEM analysis model and boundary conditions

- (2) 各部の物性値を表 1,2,3 に示す。成形に用いたアクリル樹脂については、熱伝導率、比熱の温度依存性を考慮した。Line source method[6] により熱伝導率を、DSC 法により比熱を測定した。
- (3) 解析の初期条件は、樹脂が一定温度 (240 °C) で充填されたと仮定した。

図 4 に、保圧開始から 25 秒後のレンズ内部の温度分布を示す。本研究では、後述実験の保圧時間の基準を 25sec としたので、図の温度分布はゲート部近傍を除いて、保圧過程終了時の成形品の温度分布を示すと考える。図より、金型壁面から 1mm より内側の温度は、外周部を除き、135 °C 以上であり、圧力が 100MPa 以下ならば、熔融状態であることが、図 1 よりわかる。熔融部に温度分布が存在するが、前述のように比容積分布制御は不可能であるので熔融部温度分布を量子化して代表温度で表すことにする。代表温度として、本研究は 2 種類を選定した。一つは、保圧過程熔融部 (金型壁面から 1mm の部分を除いた成形品内部) の平均温度であり、他は最高温度である。平均温度はレンズが軸対称形状であるために、各解析要素の平均温度と面積の積を求め回転方向に積分し、それらの加算値を体積で割ることにより求めた。また、最高温度は解析格子点の最高温度から求めた。図 5 に数値解析より得られた平均温度曲線と最高温度曲線を示す。ここで、保圧力による樹脂の発熱はないものとする。そのため、金型温度 (95 °C) と熔融樹脂温度 (240 °C) の 2 条件が温度解析時の成形条件である。

Table 1 Thermal conductivity and specific heat
(Die and isolation plate)

Item	Die	Isolation plate
Thermal conductivity cal/mm/s/°C	7.90×10^{-3}	5.60×10^{-5}
Specific heat cal/mm³/°C	9.12×10^{-4}	4.83×10^{-4}

Table 2 Thermal conductivity of PMMA

Temperature °C	122	182	203	225	245
Thermal conductivity $\times 10^{-5}$ cal/mm/s/°C	4.73	4.76	4.83	4.88	4.88

Table 3 Specific heat of PMMA

Temperature °C	80	100	140	160	180	200	230	250
Specific heat $\times 10^{-4}$ cal/mm³/°C	4.92	5.51	6.38	6.51	6.70	6.88	7.25	7.53

Fig. 4 Temperature contours in lens
(25 sec after holding process start)

2.2.2 保圧力曲線計算方法

ゲート形状および寸法は、保圧過程においてゲート部がガラス化によって閉鎖されないように設計されるのが通常である。すなわち、保圧過程においては金型内熔融部とノズル部の圧力は、ほぼ等しいと考えられる。したがって、ノズル部での望ましい圧力目標値 (保圧力曲線) の一つとして、前節で求めた代表温度曲線および妥当な一定比容積値を与え PVT 曲線から得られる圧力曲線を選ぶことができる。保圧力曲線の計算は、アクリル樹脂の PVT 曲線 [7] を定式化した、以下に示す改良 Tait 式 [8] を用いた。なお、式中の P は樹脂の圧力、T は同温度、V は同比容積であり、Tg はガラス転移点温度である。

$$V(P, T) = V(0, T) \{1 - 0.0894 \ln[1 + P/B(T)]\} \quad \dots \quad (1)$$

ここに、

- 1) $T \leq T_g(P)$, ガラス状態

$$V(0, T) = 0.8392 \exp(2.183 \times 10^{-4} T) \quad \dots \quad (2)$$

$$B(T) = 410 \exp(-3.977 \times 10^{-3} T) \quad \dots \quad (3)$$

- 2) $T > T_g(P)$, 熔融状態

$$V(0, T) = 0.8033 \exp(6.138 \times 10^{-4} T) \quad \dots \quad (4)$$

$$B(T) = 337 \exp(-4.848 \times 10^{-3} T) \quad \dots \quad (5)$$

Fig. 5 Temperature analysis results

Fig. 6 Holding pressure curves

であり、また、 T_g は圧力の関数として、次式で表される。

$$T_g(P) = 115.4 + 0.224 \times P \quad \dots (6)$$

保圧力は、式 (1) から次のように求められる。

$$P = (\exp \{ [1 - V(P, T)/V(0, T)] / 0.0894 \} - 1) B(T) \dots (7)$$

ここで、望ましい比容積値 $V(P, T)$ (一定値) は、後述のように予備実験により決定される。

図 6 は比容積値を定め、平均温度および最高温度曲線 (代表温度曲線) を式 (7) に代入して計算した保圧力曲線である。ここで、平均温度から求めた保圧力曲線を平均温度保圧力曲線、最高温度から求めた曲線を最高温度保圧力曲線と呼ぶ。また、図 6 に通常成形で使用されている保圧力曲線を示す。この保圧力曲線は、試行錯誤から 2 あるいは 3 段階の一定保圧力値とその時間を求めて階段状に構成する。望ましい保圧力曲線は以下の手順により決定される。

- (1) PVT 曲線および上記温度曲線から、適当な比容積値に対する保圧力曲線を求める。
- (2) 上記 (1) から得られる保圧力曲線を用いて実験を行い、成形品の形状および残留歪を評価する。成形品の形状および残留歪の仕様値が満たされれば保圧力曲線を決定したことになる。満たされない場合には、(1) に戻って比容積値を変更し実験と評価を行う。この手順を仕様値が満たされるまで繰り返す。

2.3 圧力制御システムの構成

前節の保圧力制御を行うために構築した制御システムの構成を図 7 に示す。圧力センサ (ダイニスコ社) は歪ゲージ型、最高許容圧力は 210MPa である。ノズル圧力を目標の保圧力曲線に追従させるために、制御プログラムはダイレクトディジタル制御アルゴリズム (DDC) を用いて作成し、パソコンにより制御を行った。制御部への入力にはノズル圧力測定値と目標圧力 (保圧力曲線)、出力はサーボアンプへの制御入力である。制御アルゴリズムには、I-P (積分-比例) 制御系 [9] を

Fig. 7 Configuration of pressure control system

Table 4 Control gain

Item	Kp	Ki
Gain value	2.81×10^{-3}	8.46

用いた。ここで、積分項は目標値からの偏差量を減らす役割を持つ。以下に制御部の設計手順を示す。

- (1) タグチメソッド [10] により、形状のばらつきの少ない成形条件に絞る。(具体的内容は第 3 章に記述)
- (2) ノズル先端部圧力のステップ応答特性を測定する。
- (3) 伝達関数を推定する。
- (4) 部分的モデルマッチング法 [9, 11] により制御系を設計する。
- (5) 制御基礎実験を行ない制御パラメータを決める。圧力の応答性を考慮して、被制御系のステップ応答の立上がりの $1/3$ (0.02 sec) にサンプリング時間を設定した。以上の手順から求めた制御定数を表 4 に示す。

3 実験結果

本章では、前節で述べた手法によるプラスチックレンズ成形加工の妥当性について実験的に検討した結果について述べる。

3.1 圧力制御結果

図 8 は平均温度保圧力曲線と前述の制御系により制御されたノズル圧力の測定値を示す。図 9 は最高温度保圧力曲線と制御されたノズル圧力の測定値を示す。ここで、図 8 の成形条件は表 8 の C2、図 9 の成形条件は表 8 の C3 である。

Fig. 8 Control result (Average temperature pressure curve, nozzle pressure and control input)

Fig. 9 Control result (Maximum temperature pressure curve, nozzle pressure and control input)

図よりノズル圧力は制御開始 3 秒後から制御目標圧力の $\pm 1.5\%$ 誤差以内で追従しており、制御系が妥当であることがわかる。

3.2 保圧力制御の比較結果

保圧力曲線として、平均温度保圧力曲線、最高温度保圧力曲線および階段状保圧力曲線を用いた場合の比較実験を行った。この実験から得られた成形品を評価し、最高温度、平均温度保圧力制御の場合には、比容積の最良値を、通常成形の場合には保圧力の最良値を求めた。

評価項目にはレンズの両面の平均形状からの形状偏差と歪を表す複屈折率を用いた。形状測定機はフォームタリサーフ(RTH社)を用いた。図10に形状測定領域を示す。面1, 面2についてゲート方向とゲート直角方向の形状を測定した。形状偏差は測定形状の平均形状からの偏差として定義した。複屈折率は High frequency polarization modulation method[12]を測定原理に用いた複屈折測定装置(オーク社製)を使用し、レンズ材料と等しい屈折率の標準屈折液中に

Fig. 10 Measurement area of shape profile and birefringence

Table 5 Molding factor and value of first design

Molding factor	value	Optimal value
Melt temperature °C	260 ~ 240	240
Mold temperature °C	70 ~ 90	90
Injection speed mm/s	75 ~ 150	75
Holding pressure MPa	80 ~ 186	133
Holding time sec	10 ~ 30	30
Cooling time sec	40 ~ 120	80
Nozzle back press. MPa	265 ~ 795	265
Screw rotating speed rpm	55 ~ 109	109
Gate (shape) mm	square(2×2), rectangular(3×2.5)	square

Table 6 Molding factor and value of second design

Molding factor	Value
Mold temperature °C	85 ~ 95
Holding pressure of Conventional control MPa	119 ~ 172
Specific volume of Average temp. control cm ³ /g	0.853 ~ 0.843
Specific volume of Maximum temp. control cm ³ /g	0.860 ~ 0.850
Holding time sec	25 ~ 35
Cooling time sec	70 ~ 110

レンズを浸して測定した。測定点を図10に示す。評価は3つの測定点データを平均して行った。

実験条件の設計は3回行った。1次設計は階段状保圧力制御を用いて、L18直交表(2水準因子1個, 3水準因子7個を割り付け、水準と因子の組み合わせを作成する表)に表5の因子と条件を設定して行った。評価はタグチメソッド望小特性を用いて、形状偏差が最小になる条件を求めた。1次設計により得られた最良成形条件を表5に示す。この最良成形条件を用いて、制御系の設計を行った。この条件中から形状偏差値への効果が大い、金型温度、保圧力、保圧時間、冷却時間を因子に選定し2次設計を行った。2次設計の条件を表6に示す。ここで、平均および最高温度保圧力制御では比容積値を、階段状保圧力制御では保圧力値を実験条件とした。2次設計では1次設計で因子を絞り込んだため、L9直交表(3水準因子4個を割り付け、水準と因子の組み合わせを作成する表)を用いた。2次設計から選定された最良条件を表7に示す。さらに、3次設計では求めた最良条件を基礎として、平均温度および最高温度保圧力制御では比容積値を、階段状保圧力制御では保圧力値を小刻みに変えて成形実験を行い、形状偏差の最小となる条件を見つけ、各制御法の最良条件とした。3次設計の最良条件で得られた成形品の形状偏差・複屈折率を評価し、各制御法の比較を行った。3次設計で得られた比容積値と保圧力値を表8に示す。

表8の条件における形状偏差値とそのばらつき、複屈折率

Table 7 Optimal factor value of each control method (second design)

Molding factor	Optimal value		
	C1	C2	C3
Mold temperature °C	85	95	95
Holding pressure MPa	146	—	—
Specific volume cm ³ /g	—	0.853	0.830
Holding time (sec)	25	25	35
Cooling time (sec)	70	70	90

C1 : Stepwise control

C2 : Average temperature control

C3 : Maximum temperature control

Table 8 Optimal factor value of each control method (third design)

Molding factor	Optimal value		
	C1	C2	C3
Die temp. °C	85	95	95
Holding pressure MPa	122	—	—
Specific volume cm ³ /g	—	0.8555	0.8640
Holding time sec	25	25	35
Cooling time sec	70	70	90

Table 9 Shape deviation and birefringence of each control method (third design)

Control method	Birefringence (nm)	Shape deviation (μm)			
		Surface1		Surface2	
		deviation	σ	deviation	σ
Stepwise control	91.8	0.63	0.17	0.79	0.08
Ave. temp. control	76.2	0.57	0.08	0.56	0.03
Max. temp. control	90.9	0.94	0.08	0.86	0.09

とそのばらつきを表9に示す。表より、平均温度保圧力制御法は通常成形の階段状保圧力制御と比べて第1面の形状偏差を10%,第2面の形状偏差を29%および複屈折率を17%改善した。また、形状偏差の標準偏差値 σ も平均温度保圧力制御法は階段状保圧力制御の半分以下であり、成形品のばらつきを低くおさえられた。

4 ま と め

プラスチックレンズを対象として、射出成形の保圧工程において、熔融状態の樹脂の代表温度を基礎として、成形品の比容積変化を小さくする圧力制御法を提案し、その有効性を検討した。結果を要約すれば以下のものである。

- (1) 伝熱数値解析から得られる成形品の熔融部の平均と最高温度を代表温度として、PVT曲線から比容積を一定とした制御目標保圧力曲線を計算する方法を提案した。
- (2) デジタルI-P制御系を用いて、制御目標保圧力曲線に高精度に追従する制御系を構築し、その有効性を確認した。
- (3) 平均温度曲線を用いた比容積一定保圧力制御法は、従来法に比べて、精度を10%から29%,残留歪を17%改善し、厚肉のプラスチックレンズの低歪・高精度成形に有効であることが確認された。
- (4) 実験による試行錯誤から求めていた保圧曲線の形状を、物性値と温度解析結果から設計する方法を提案した。このことから、成形加工技術の計算機支援をより促進できると考える。
- (5) 本手法は射出成形の他に低圧鋳造の分野にも適用できると考える。

参考文献

- [1] K. Gissing, W. Knappe, Zum optimalen Nachdruckverlauf beim Spritzgießen thermoplastischer Kunststoffe, Kunststoffe, 73-5 (1983), 241-245.
- [2] 早崎, 永田, 最近の精密成形技術におけるプロセスコントロール, 成形加工, 3-10 (1991), 657-666.
- [3] 焼本, 他, 熱可塑性樹脂の射出成形における適応制御, 成形加工'94, (1994), 217-220.
- [4] T. Maruyama, M. Takagi, Y. Noro, ZOOM LENS SYSTEM WITH ASPHERICAL PLASTIC LENS, IEEE CE, 33-3 (1987), 256-265.
- [5] 伊藤, 高精度プラスチックレンズのための新成形法—ゲートシール成形法—, 成形加工, 3-7 (1991), 457-462.
- [6] H. Lobo, C. Cohen, Measurement of Thermal Conductivity of Polymer Melts by the Line Source Method, ANTEC, (1988), 609-611.
- [7] P. Zoller, Apparatus for measuring pressure-volume-temperature relationship of polymers 350 °C and 220kg/cm², Rev. Sci. Instrum., 47-7 (1976), 948-952.
- [8] O. Olabisi, R. Simha, Configurational Thermodynamic Properties of Amorphous Polymers and Polymer Melts. Theoretical Considerations, Macromolecules, 8-2, (1975), 211-218.
- [9] 北森, 制御対象の部分知識に基づく制御系の設計手法, 計測自動学会論文集, 15-4 (1979), 549-555.
- [10] 田口玄一, 品質工学講座 1, (1988), 日本規格協会, 73-90.
- [11] 重政, 飯野, 制御系設計のための実用的な汎用参照モデル, 計測自動学会論文集, 19-7 (1983), 592-594.
- [12] F. A. Modine, R. W. Major, High frequency Polarization Modulation Method for Measuring Birefringence, Appl. Optics, 14-3 (1975), 761-764.