高精度プラスチック光学部品の新成形法

—リメルト成形法—

渡部 順*・小瀬 古久秋*

1. はじめに

レーザープリンター、複写機を中心とするデジタル機器のレーザー書込光学ユニットに用いられている、レンズ、ミラーなどの走査光学部品は、従来ガラスが用いられていたが、コストダウン、軽量化のためにプラスチック化が急速に進んでいる。当社でもすでに、独自の工法である「ゲートシール成形法（通称：「GATESEAL/ゲートシール」®）[†]」を開発し、ガラスと同等の高精度なプラスチック光学部品を生産している¹⁾。

プラスチック光学部品は、その高い生産性から形状の非球面化による性能の向上が図られるとともに、求められる品質も厳しくなり、さらなる高精度化、低価格化、大口径化が必要になってきている。

そこで、筆者らは新たに高精度なプラスチック光学部品を、低価格で生産するための製法「リメルト成形法（通称：「REMELT/リメルト」TM）[†]」を開発・実用化した²⁾。

本稿では、新たに開発した「リメルト成形法」の原理について述べるとともに、本成形法をデジタル複写機のレーザー書込光学ユニットに搭載されているfθミラーおよびfθレンズに適用した事例について報告する。

2. 成形の考え方

通常の射出成形においては、熔融樹脂を熱変形温度（HDT）以下のキャビティ内に高压で充填するため、成形品表層部や薄肉部は高压下で急冷固化し、残留応力が大で、高密度となる。一方、成形品厚肉部は、表層部や薄肉部より遅れて冷却が始まるため、低压下で固化し、低密度となる。その結果、成形品各部での収縮

量の差がひけとなって現れ、内部には残留応力や密度分布が発生し、高精度な成形品が得られなくなる。

この解決手段として、金型を樹脂のガラス転移温度（ T_g ）以上に保持して高压射出充填し、その後キャビティ内温度を均一にして徐冷する方法が知られている。この方法はガラス転移温度以上の金型では充填時に樹脂が固化しないためゲート部を封止することができない、温度均一下での徐冷は時間がかかりすぎて生産性が悪いという大きな課題がある。

ここで、熱可塑性樹脂の挙動を、もう少し基本的現象としてとらえてみる。

大気中に樹脂の固まりがあると仮定する（図1）。これを室温から加熱していくと熱膨張により体積が増加していく。樹脂がその熱変形温度になったとき、樹脂と同一体積のキャビティ空間を有する金型で樹脂を包むとする。加熱を続けると今度は体積増加ができなくなるため、樹脂による圧力（樹脂内圧）が不均一に金型キャビティ内面に発生する。さらに加熱を続け、ガラス転移温度以上になると樹脂は固相から液相へと変化し、変形を伴って樹脂が完全密着する。今度は逆にこの状態からキャビティ内樹脂各部での圧力・温度分布を均一にして徐冷していくと、再び固相となり、樹脂内圧は低下し大気圧となる。このとき、樹脂の体積は金型の空間と同じになるとともに、その形状はキャビティ内面を1:1に転写したものとなる。

この原理を成形法に適用すれば、ゲート部が存在しないのであるから、上述のゲート部の封止という課題

図1 樹脂の圧力挙動

* Watanabe, Jun/Furuseko, Hisaaki
リコー(株) 生産技術研究所
厚木市下荻野 1005 (〒243-0298)
1998.5.29 受理

[†] 「REMELT/リメルト」は(株)リコーの商標。
「GATESEAL/ゲートシール」は(株)リコーの登録商標。

が解決するとともに、キャビティ内面を忠実に転写した高精度な成形が可能となると予測される。われわれは、この成形法をその原理をもとに「リメルト成形法」と銘名した。

3. リメルト成形法の原理

「リメルト成形法」では、成形品の形状創成と面精度の確保を別の工程で行うことにより、前述した成形品内の残留応力や密度分布を緩和させ、精度良い成形品の作製を実現させている。

図2に「リメルト成形法」の原理図を示す。本成形法は以下の2工程からなる。

- ① ブランク成形工程：通常の射出成形によって、最終成形品形状とほぼ同形状の成形品(ブランク)を得る。
- ② 面転写工程：鏡面部を有しかつゲート部を有しない別の金型にブランクを挿入し、加熱・冷却して鏡面を転写させる。

ブランク成形工程は、前述のように通常の射出成形であるため、熔融樹脂が熱変形温度以下の金型に充填される過程で表層部が急冷固化し、ブランクはひけを有し、鏡面も転写していなければ、残留応力も大きなものとなる。

面転写工程は、この低精度なブランクを高精度化する

る工程である。金型を使用樹脂のガラス転移温度以上に加熱することによって、残留応力を緩和させることができる。さらに、加熱時の樹脂の軟化・熱膨張によってキャビティ内に均一な樹脂内圧を発生できるため、高精度な面転写を実現することができる。

冷却は、温度分布、圧力分布が生じるのを防ぐため、ゆっくり冷却(徐冷)を行う。また、型開き・成形品取り出しの際、成形品が変形しないよう熱変形温度以下までキャビティ内を冷却する必要がある。

なお、高精度成形品を得るためには、型開き時に樹脂内圧をほぼ大気圧にする必要がある。ゆえに、キャビティ容積一定下でのブランク重量のばらつきが、本成形法の重要なポイントとなる。

4. 応用例

ここでは、代表的なプラスチック光学部品であるfθミラーとfθレンズへの応用例について述べる。

4.1 fθミラー

図3にfθミラーの形状を示す。全長が235 mm、近似R 370 mmと非常に長尺、大口径な非球面形状で、成形品長手方向で圧力分布が生じやすく、精度が出にくい。

なお、近似Rとは、設計上の非球面係数を用いて形状測定データを最適近似した曲率半径のことである。

成形樹脂には、ガラス転移温度140℃、熱変形温度122℃のCOC(シクロオレフィンコポリマー)を使用

図3 fθミラーの形状

図4 ブランク重量と近似Rの関係

図2 リメルト成形法の原理

した。面転写工程での成形条件は、加熱温度 155℃、成形品取り出し温度 120℃である。

a. ブランク重量と近似 R

「リメルト成形法」では、成形品の精度がブランク重量のばらつきに影響されることはすでに述べた。このことを逆に利用すると、ブランク重量を管理することによって、所望の形状の成形品を得ることができる。

図 4 には $f\theta$ ミラーの場合のブランク重量と近似 R の関係を示す。縦軸は各ブランク重量での成形品近似 R を示す。この成形品の場合、ブランク重量と近似 R は比例関係にあり、ブランク重量を調節することによって求められる近似 R が得られることがわかる。

ただし、 $f\theta$ ミラーの場合、非常に大口径で、リブ部を有する複雑形状になっているために、ブランク重量が 0.03 g (0.1 %) 変化するだけで近似 R が約 1 mm 変化し、その重量許容幅は非常に厳しくなる。

b. 面転写工程での圧力分布

「リメルト成形法」の面転写工程では、まず樹脂のガラス転移温度以上に加熱することによって、ブランクとキャビティの形状差によって生じる圧力分布を緩和する。

図 5 は、面転写工程での成形品長手方向圧力分布を示している。測定位置は図 3 中 (A), (B), (C) の 3

図 5 $f\theta$ ミラー長手方向圧力分布 (最適化前)

図 6 $f\theta$ ミラー長手方向圧力分布 (最適化後)

点に対応する。

$f\theta$ ミラーのような長尺成形品を成形する場合には、成形品長手方向での圧力分布が生じやすく、面転写工程においてもその圧力の偏在を解消することは難しい。そのため、このままでは高精度な成形品を作製することができない。面転写工程での加熱温度を高くする、もしくは加熱後の保持時間をのばすことによって圧力の均一化を達成することができるが、これらの手段はいずれも成形サイクルの犠牲を余儀なくさせるものである。

本成形法は、あらかじめブランク形状を発生圧力が均一となるように最適化することによって、この問題に対処することができる。すなわち、面転写工程で圧力の高くなる部分は、その部分を最終形状より薄肉にしたブランク形状とすることによって、面転写工程での圧力分布を低減させることができる。

図 6 には、ブランク形状最適化後の面転写工程での成形品長手方向圧力分布を示す。加熱時には金型温度むらがあるために、各位置での圧力の立ち上がりにはばらつきがあるが、冷却過程においては圧力の均一化が進み、成形品取り出し時にはほぼ成形品長手方向での圧力分布がなくなっていることがわかる。

このようにして、作製された $f\theta$ ミラーの形状測定結果の一例を図 7 に示す。なお、形状が非球面でありレーザー干渉計を用いて評価することができないため、形状測定は当社が独自に開発した光触針形状測定機を用いた³⁾。±100 mm の範囲で反射面うねり 4 μm 以下の高精度な成形品を得た。

4.2 $f\theta$ レンズ

図 8 に $f\theta$ レンズの形状を示す。両端部肉厚 5 mm に対して中央部肉厚 15 mm とかまぼこ形の偏肉形状であり、薄肉部と厚肉部で圧力分布が生じやすく精度が出しにくい。また、レンズは透過系光学部品であるために、面精度だけでなく、内部ひずみが少ないことが要求される。

成形樹脂には、ガラス転移温度 148℃、熱変形温度

図 7 $f\theta$ ミラーの形状測定結果

図 8 $f\theta$ レンズの形状

図 9 $f\theta$ レンズの光弾性縞

135°C の PC (ポリカーボネート) を使用した。面転写工程での成形条件は、加熱温度 140～175°C、成形品取り出し温度 130°C である。

a. 内部ひずみの均質化

前述したように、 $f\theta$ レンズの場合は透過光学系であるために、成形品表面の面精度だけでなく、内部ひずみの低減も求められる。ここでは、 $f\theta$ ミラー成形との相違である内部ひずみに関して述べる。

図 9 には直交に配置した偏光板間に成形品を置いて観察した光弾性縞を示す。光弾性縞の本数が密であるほど内部ひずみが大きいことを示している。

面転写工程での加熱温度が高いほど、光弾性縞は少なくなり、残留応力の緩和が進むことがわかる。

$f\theta$ ミラーの場合のように面精度のみが必要な場合には、面転写工程での加熱はガラス転移温度 +10～15°C 程度でよい。しかし、 $f\theta$ レンズのように内部ひずみまで低減するには、加熱温度をさらに高くする必要がある。170°C (ガラス転移温度 +22°C) 以上の加熱で、残留応力が著しく低減している。

このように、本成形法は面転写と内部ひずみ除去を

図 10 成形品密度と加熱温度の関係

分けて取り扱うことができる。これは、高精度なプラスチック光学部品を研究開発する上で多くの情報をもたらす。例えば、樹脂として複屈折の小さいものを用いれば、加熱温度をより低くできることになり、結果として生産性向上が可能となる。

なお、両端の薄肉部での光弾性縞がかなり密になり、内部ひずみが大きくなっている。これはブランク成形時の高分子の配向を含む高压下での急冷固化による影響を引きずっているものであり、 $f\theta$ ミラー同様に、ブランク形状の最適化で改善できるものである。

b. 密度分布の変化

図 10 は面転写工程での加熱温度と成形品の密度の関係を示している。密度は、ガラス転移温度 (148°C) 前後の 147～148°C の間で急激に変化し、小さくなっている。これは、この温度以上で密度が粗の方向に均質化したことを示している。一方、前章で述べたように、複屈折の原因となる内部ひずみを低減するためには、ガラス転移温度 +22°C 以上の加熱が必要である。

以上のことは、非常に興味ある情報を与えてくれる。密度分布は屈折率分布に関係していることから、屈折率分布と複屈折の緩和温度域は異なる。すなわち、分子配向に基づく複屈折の緩和温度域はより高温側にある。高分子の分子間に働く相互作用エネルギーの差によるものであろう。

図 11 はこのようにして作製された $f\theta$ レンズの干渉縞写真である。レンズ面の全面にわたって高精度が保たれているのがわかる。

5. 成形システム

「リメルト成形法」のブランク成形工程は通常の射出成形であるために、成形サイクルは短い。面転写工程では、加熱・冷却工程が必要であるために、成形サイクルが長いという欠点がある。しかし、通常の射出成形のような射出・充填工程を必要としないため、成形時の発生圧力が 25 MPa 以下 (通常の射出成形では

測定位置

図 11 $f\theta$ レンズの干渉縞

図 12 リメルト成形システム

100 MPa 程度)と小さくてすむ。したがって、金型に高い剛性が要求されないため、コンパクトな金型で多数個取りができ、成形サイクルが長い欠点を取り数でカバーすることによって、生産性を補うことができる。

このように個々に特徴のあるブランク工程と面転写工程を並行して行うことにより、生産性に優れたシステムを構築することができる。

図 12 には、「リメルト成形システム」の概略図を示す。「リメルト成形法」の面転写工程での設備は型開閉可能なプレス機のみである。また、金型はゲートやスブルーといったものが不要で、前述したように剛性が小さくてもよく、安価に製作することができる。したがって、設備の増設が容易であり、生産量に応じて適宜安価な設備投資で対応することができるフレキシブルな生産システムとなっている。

図 13, 14 には、「リメルト成形法」で実際に作製した $f\theta$ ミラーおよび $f\theta$ レンズの写真を示す。

図 13 $f\theta$ ミラーの写真

図 14 $f\theta$ レンズの写真

6. おわりに

われわれは、形状創成と面精度および内部ひずみの均質化を別工程で行うことにより、長尺、偏肉、大口径のプラスチック光学部品をガラス並みの高精度で作製することに成功した。本成形法は、今回述べたプラスチック光学部品だけでなくさまざまなプラスチック部品への高精度化に寄与できるものと確信する。

参考文献

- 1) 伊藤：成形加工, 3 (7), 457-462 (1991)
- 2) 小瀬古, 平野, 渡部：第 6 回プラスチック成形加工学会年次大会予稿集, 309-310 (1994)
- 3) 井関, 高橋, 吉川, 新保：Ricoh Technical Report, No.23, 74-77 (1998)