成形機および金型の剛性が転写特性に及ぼす影響

安原 鋭幸*・加藤 和典*・杉本 敦*・大竹 尚登*

Measurement of Stiffness of Mold Closing System and Mold Plates in Injection Molding and Its Effect on Transcription Property

Yasuhara, Toshiyuki*/Kato, Kazunori*/Sigimoto, Atsushi*/Ohtake, Naoto*

In injection molding of an optical disk, mis-transcription of pits sometimes occurs, especially when pit density is low and smooth surface part is dominant. Deformation of a mold and injection molding machine may possibly make influence on transcription property in such situation. In this paper, direct measurement of mold cavity gap has been carried out, together with microscopic observation of transcription state, and the relationship between them was discussed. Finally, the following conclusions were obtained. (1) Low stiffness of mold closing system is suitable for precise transcription of a fine pattern, because cavity pressure decrease in cooling state is retarded. (2) Mold closing force should be applied to the mold itself, settled on the fixed platen, both in usual injection and injection compression molding, for preventing detachment of the mold from the platen due to nozzle contacting force.

Key words : Injection molding/Stiffness of mold/Transcription property/Direct measurement of mold cavity gap

1. 緒 言

射出成形時に生じる成形不良は多様であるが、光学部品の成形においては金型の平滑面や微細形状の転写性が特に重要である。光ディスク基板の場合ピットの高さは100 nm程度であり今後さらに微細化することが予想される。

このような微細形状の成形にもかかわらず、高い成形圧力が必要なため成形機および金型の各部には成形中10～100 μ mのオーダーの大きな変位を生じる。しかしこの変形がサブ μ mの形状の転写精度に及ぼす影響については不明の点が多い。

精度の向上を図るために従来は成形機・金型の剛性を高めることが一つの方法とされてきたと思われるが、一方で成形のハイサイクル化の要求がありそのためには金型の小型化、型締め力の低減という相反する要求がある。このような状況において、適正条件の選定基準を明確にするためには成形中の成形機および金型の各部位の変形挙動を把握し、これらの挙動と転写成形特性との関係を明らかにすることが不可欠である。

そこで本研究では、射出成形機の可動側プラテンに油圧シリンダを取り付けた射出圧縮成形機を用いた型締め力受圧部の剛性を変えたいくつかの方式について、成形機お

よび金型各部の撓み測定を行い、光ディスク基板の成形を行ってピットの転写性への影響を明らかにする。

2. 実験方法

2.1 成形機およびスタンパ

射出成形機は住友ネスタールネオマット150/75 A (型締め力735 kN)を用いた。この成形機の型締め方式はトグル式である。型内圧力を均等化するため射出圧縮法が用いられることが多いが、その成形方式の特性も調べることで油圧圧縮シリンダを成形機内に装備した。その油圧シリンダと金型の基本的な部分を図1に示す。ここで金型キャビティ部は固定側と可動側の型がはめあい方式で構成されるものとする。そして通常の射出成形を行う場合はピストン部の突出量を零にしたままで成形を行う。また射出

Fig. 1 Schematic of mold setup

* 東京工業大学機械物理工学専攻
東京都目黒区大岡山 2-12-1 (〒152-8552)
Dept. of Mech. Eng. and Sce.
Tokyo Institute of Technology
O-okayama 2-12-1, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan
2001. 3. 29 受理

圧縮成形では、射出開始後適当な時期にピストン部を進行させる。なお、本実験において射出条件設定は、流入段階、保圧段階を通して一定圧力を一定時間保持する単純な形式のものとする。

スタンプはサンプルサーボ方式の光ディスク用（図2）で、平滑部が広く樹脂とスタンプ内ですべりを生じやすいので多重転写等の成形不良を生じやすい。これを固定側に装着する。成形品は直径 120 mm、厚さ 1.2 mm の円板である。

成形材料としてはポリスチレン（旭化成スチロン 679 R）を用いた。転写の状態は微分干渉顕微鏡でピット転写部を拡大観察して評価した。金型内圧力の測定には市販の圧力センサー（ダイニスコ製 DSA 449-1.5 M）を用いた。

2.2 型締め力受圧方式

圧縮工程なしの通常の射出成形法については、型締め力を固定・可動金型間で受ける方式（方式 A）とプラテン間に設置したスペーサ（断面積 $30 \times 40 \text{ mm}^2$ の 4 本の角棒）で受けるもの（方式 B）を採用した。後者は型締めの剛性を故意に低くしたものである。

また、射出圧縮成形法では型締め力をプラテン間で受ける場合（方式 C）についてのみ実験した。

2.3 射出成形機および金型の変形の測定

射出成形機と型の動きを把握するため、まず方式 B の成形において a. ロケートリング、b. 可動側金型のキャビティ側面、c. 固定側プラテン、d. 可動側プラテンの 4 点（図3）の変位を測定した。ここで b, c, d については射出成形機外部に固定したマイクロメータを用いて測定し、a

Fig. 2 Pits pattern of optical disk

Fig. 3 Displacement measurement during injection molding

についてのみ固定側プラテンを基準として測った。

ところで、成形機および金型の各部位の変形は最終的には金型キャビティの間隙の変化となって現れ、これが転写不良の生成特性に関わることになる。よってこの間隙を直接測定することとした。

図4は自作のギャップセンサーである。このセンサーは可動側金型に固定されたバネにより支持された針がスタンプ表面に接触して、その変位をひずみゲージがひろう。これにより可動側と固定側の金型の相対変位を成形過程を通じて測定することができる。このセンサーは中心から 20 mm と 50 mm の 2 点に装着した。

3. 通常の射出成形法における成形機・金型の変位測定

3.1 型内圧力

成形方式 A における金型内圧力の推移を図5に示す。(a), (b)図は保圧 $P_h = 37 \text{ MPa}$ および 68 MPa に対するもので、2本の線図はセンサーの半径位置 $r = 0 \text{ mm}$ および 50 mm に対応する。射出時間は充填後の保圧時間 Δt_h を

Fig. 4 Gap sensor

(a) P_h : Holding pressure = 37 MPa

(b) $P_h = 68 \text{ MPa}$

Fig. 5 Cavity pressure in case of stiff supporting condition of mold closing force in usual injection molding (F_m : Mold closing force = 600 kN)

0.5 s とするように設定している。 P_h が大きい場合 (図 5 (b)) 金型内圧力低下は円板の内側で急であるが、これは樹脂の逆流に伴う型内圧力の低下と間隙の縮小によるものである。

成形方式 B においては、図 6 に示すように、型締め剛性が低いために多量の樹脂が型内に流入し、除圧後大きな逆流を生じる。ここで保圧 $P_h = 63$ MPa である。しかし、冷却が進むとその時点で流動は止まり、圧力が残る結果になる。このような流動挙動の推測は金型各部の変位測定の結果によって裏付けられる。

3.2 金型各部の変位

ロケットリングは固定側金型と中央に近い部分でボルト結合されている。よってロケットリングの変位は金型中央部の変位に対応する。その変位の測定結果を図 7(a) に太い実線で示す。ここで型締めは B 方式で型締め力 $F_m = 300$ kN としている。太い点線は可動側金型の変位である。また図 7(b) に圧力履歴を示す。金型内圧力は中心から 25 mm, 50 mm における値である。(a) 図によれば、射出直前のノズル接触により $70\mu\text{m}$ 程度変位した後、樹脂が金型内

Fig. 6 Cavity pressure in case of flexible supporting condition of mold closing force in usual injection molding ($P_h = 63$ MPa, $F_m = 600$ kN)

Fig. 7 Displacement of mold parts in case of flexible supporting condition of mold closing force in usual injection molding ($P_h = 10$ MPa, $F_m = 300$ kN)

に充填すると金型間が広がる方向に $20\mu\text{m}$ 程度変位する。その後、樹脂の収縮とともにノズル接触力が勝り金型間は狭くなる。なお、ノズル接触力は約 33.7 kN である。

保圧 P_h が大きくなると (図 8) 樹脂の充填率が高くなるため金型間の間隔は射出後一定になりノズル接触力による回復は見られなくなる。ここで、保圧の大小にかかわらず固定側のプラテン、可動側のプラテンの変位は小さく $5\mu\text{m}$ 以下にとどまる。

3.3 金型キャビティ間隙の測定

金型の変形は最終的に金型キャビティ間隙の変化となって成形特性に影響を及ぼす。そこでキャビティ間隙を接触ピン (図 4) によって直接測定し、上述の金型各部の変位との関係を明らかにする。

(a) 型締め力を金型で受ける場合 (方式 A)

キャビティ間隔の変化 δh を図 9 に示す。ここで (a), (b) 図はそれぞれ、金型内スプルー直下圧力の最大値 P_h が 5, 60 MPa の場合のものである。(a-ii) は (a-i) の拡大図である。保圧の小さい場合 ($P_h = 5$ MPa), ノズル接触時に固定側金型がたわみ中央部がプラテンから離れるためキャビティ間隔 δh はいくらか減少するが、射出開始後型内圧力の増加とともに、 δh は増大し、その後最初の設定厚さに戻る。一方、保圧が大きい場合 ($P_h = 60$ MPa) は型内圧力によりキャビティ中央の間隔が周辺に比べて大きくなる。そしてこれが成形品の厚さ分布となって残る。ただし、キャビティ間隙の変化 δh の測定では型締め終了時を基準としており、基準時点の厚さ分布は含まれていない。ここでこの間隙変化は、金型のたわみによるが、可動側の型板は 75 mm と厚くたわみは小さいと考えられるため、主に固定側のたわみによるものと推測される。固定側のプラテンの中央にはロケットリング挿入用の穴 (直径 120 mm) がある。したがって、その部分の固定側の型板はプラテンに支持されないため容易にたわむと考えられる。このことは、成形品厚さ分布の均一化のためには特に固定側の型板の剛性とロケットリング部にあたるプラテンの穴の大きさに注意する必要があることを示唆するものである。

(b) 型締め力をプラテン間で受ける場合 (方式 B)

結果を図 10(a), (b) に示す。この場合は固定側金型が型締め力によってプラテンに押しつけられていないため、ノズル接触時に金型がプラテンから離れる結果になる。

Fig. 8 Displacement of mold parts in case of flexible supporting condition of mold closing force in usual injection molding ($P_h = 20$ MPa, $F_m = 300$ kN)

よって、型が横移動する危険がある。また金型の剛性が低い場合射出圧力により金型が大きく開く。ただし可動側型板には型締め力はかけていないことより可動側型板の曲げ変形はなくキャビティ厚さ δh は一樣に変化する。そして、 δh は保圧のピーク値 P_h が小さいときはノズル接触時の力によってマイナスになる（(a-i)図）。一方 P_h が大きくなると δh は一旦は大きく増加し、その後減少する（(b)図）。しかし、その減少量は P_h が小さい場合とほぼ等しく、これは主に材料の温度低下によるもので、これに材料の逆流と圧力除荷による変形回復（符号は逆になる）の効果があがる程度加わったものと解釈できる。

4. 射出圧縮成形における成形特性

射出圧縮成形の場合には圧縮をかけるタイミングにより厚さが大きく変化してしまう。そこで、本実験において射出はジャストバックまでとし、その直後に圧縮を開始するようにした。金型内圧力の測定結果の一例を図11に示す。ここで圧縮用シリンダ圧力は金型内圧力に換算して60

MPa、圧力保持時間は10 sであるが、圧力波形は精度の良い矩形になっていることがわかる。

金型内圧力は金型中央と半径50 mmの2ヶ所で測定した。応答は極めて良く、圧縮シリンダ圧力に対して0.2 s以内の遅れで立ち上がっている。圧力の大きさは、初期には中央の方がやや低い、金型内全面にわたってほぼ様な圧力が付与できていることがわかる。冷却が進むにつれて低下するが、約10 s後には一定になる。中央では零になる。

金型キャビティ間隙の変化 δh は図12(a), (b)の通りで、圧縮時間 $\Delta t_c = 1.0$ s, 10 sの場合、共にノズル接触時間に大きな減少がありその後射出により急激に拡大し、圧縮開始後漸減する。ここで δh の2本の線図は半径位置 $r = 25, 50$ mmに対するもので、両者がほぼ一致することより金型面はほとんど曲げ変形は受けず剛体的に変位していることがわかる。圧力変化の特性は圧縮圧力が保持時間にほとんど依存せず、圧縮時間が10 sと長い場合にキャビティ内圧力が零にならないという点で上述の図10(b)と似

Fig. 9 Cavity thickness in case of stiff supporting condition of mold closing force in usual injection molding ($F_m = 600$ kN)

Fig. 10 Cavity thickness in case of flexible supporting condition of mold closing force in usual injection molding ($F_m = 600$ kN)

ているが、このことはすでに述べたように材料の冷却による収縮に基づく現象として理解できる。材料の圧縮性の影響は小さい。

5. ピットの転写特性への影響

本研究では図2に示すようなスタンプを用いているが、

Fig. 11 Cavity pressure in injection compression molding ($\Delta t_c = 10.0$ s, $P_c = 60$ MPa)

この成形では図13(a), (b)に示すような転写不良が現れ

Fig. 12 Cavity thickness in injection compression molding ($P_c = 60$ MPa)

Fig. 13 Microscopic observation of transcribed pits

る。これらをそれぞれ「多重転写」, 「転写ずれ」と呼ぶ¹⁾。このほかに、転写ずれの方向が半径方向のピット列に沿って現れる場合があり、これを「半径方向転写ずれ」と呼ぶ。これらの転写不良の生成特性についてはすでに射出圧縮成形による成形によって検討し、圧縮時間が短いと多重転写が発生し、逆に長くなると転写ずれが発生することを示している¹⁾。この現象には冷却過程での金型内圧力が大きく関係すると考えられる。

3章に述べた型締め方法の異なる成形方式AおよびBでは型締め剛性が大きく異なり、これが冷却時の金型内圧力にも影響している。そこで成形方式AおよびBにおける転写特性について検討する。すなわち、成形されたディスクの代表的な16方向の半径線に沿ってピットの転写状態を観察し上述の3種類の転写不良の現れる場所を濃度の異なる帯としてディスク面上に示す。ここで成形条件としては、保圧 P_h 、冷却時間 Δt_c 、型締め力 F_m を変化させた。金型温度 T_h は主に40℃としたが、60、80℃についても検討した。樹脂温度 T_b は一定(240℃)である。

5.1 射出成形法(方式A)の転写特性

方式Aによる成形結果を図14に示す。(a), (b)図はそれぞれ型締め力 $F_m = 300$ kN, 600 kNに対するものである。金型温度が低いいためディスク面全面にわたって多重転写の状態になっている。そして型締め力の大きさはほとんど影響していない。このことは型締め剛性の高い方式Aでは型締め力自体がキャビティ間隙等に大きな影響を及ぼすことがないことより、予想される通りの結果である。

なお、ディスクの周辺部分にはほとんど半径方向転写ずれを生じているが、これは、外周はほとんど張力なしの自由表面になるため、外周付近はディスク面にかなりの大きさの圧力が残った状態で収縮による移動が起こることによる結果といえる。この現象はTitmanlioら⁹⁾が指摘している通りである。

図15は保圧の高い場合($P_h = 60$ MPa)である。このように圧力が高くなればスタンプと樹脂の間のすべりを拘束する摩擦応力の限界値が上昇するため、すべりが少なくなり多重転写領域は図14と比較して減少する。

Fig. 14 Mis-transcription distribution in case of low holding pressure and stiff supporting condition in usual injection molding ($T_b = 40^\circ\text{C}$, $P_h = 30$ MPa) (Light half tone part ■ : multiple transcription; Dark half tone part ■ : Scratches; Black part ■ : radial scratches)

なお、図 14 および図 15 と同じ条件で金型温度を高くすれば（例えば $T_b = 60^\circ\text{C}$ ），当然多重転写領域は大幅に減少する（実験結果は省略）。

5.2 射出成形法（方式 B）の転写特性

型締め剛性の低い方式 B についての結果を図 16 に示す。(a), (b) 図はそれぞれ型締め力 $F_m = 300, 600 \text{ kN}$ に対するものである。型締め剛性の高い図 14(a), (b) と比較すると多重転写領域が少なくなっている，その理由は型締め剛性が低い場合冷却過程における型内圧力の減少が遅く，これが樹脂とスタンパとのすべりを妨げる効果を与えたものと推測できる。

図 16(a), (b) の間の型締め力による違いは十分明確ではないが，本研究の金型ではゲートとして通常のフィルムゲート方式を用いているため，型締め力の上昇によりゲート間隙がいくらか狭くなりこれが冷却初期の樹脂の逆流を妨げ金型内圧力の低下を遅らせたものと推測する。保圧を高くした場合 ($P_h = 60 \text{ MPa}$) は多重転写領域は大幅に減少する（実験結果は省略）。

5.3 射出圧縮成形の転写特性

射出圧縮成形においては圧縮時間および冷却時間を短くすれば転写不良をほとんど消すことができる。これは文献 1) において検討したとおりである。

5.4 金型温度の影響

金型温度の高い場合 ($T_b = 80^\circ\text{C}$) について述べる。図 17 は方式 A によるものである ($P_h = 30 \text{ MPa}$, $F_m = 600 \text{ kN}$, $\Delta t_c = 0.5 \text{ s}$)。図 14(a) と比較すると，成形不良は円板周辺

を除きすべて消失する。

5.5 冷却過程における圧力と転写不良

射出圧縮装置を用いて図 18 に示すとおり第一段階の圧縮で転写のみを行い，第二段階の圧縮力 P_2 を $5 \sim 30 \text{ MPa}$ の間で変化させて転写ずれや多重転写が発生する圧力条件を調べた。その結果を図 19 に示す。第二段階の圧縮圧力が 30 MPa の場合は多重転写は発生しないが， 15 MPa まで下げると徐々に多重転写が発生し始め， 5 MPa になると発生領域が大きくなる。この結果より，材料がスタンパに対してすべりを生じはじめる摩擦応力は，金型内圧力 $P = 5 \sim 15 \text{ MPa}$ に対応する値であることがわかる。

なお Pantani ら⁶⁾は，離型時材料と型との間にすべりを生じはじめる条件を PS についてひずみゲージにより測定し保圧が $32 \sim 25 \text{ MPa}$ 以下になると保圧中にすべりを生じる，という結果を得ている。すべりには多くの条件が関与

Fig. 17 The case of high mold temperature in usual injection molding ($T_b = 80^\circ\text{C}$, $P_h = 30 \text{ MPa}$, $F_m = 600 \text{ kN}$)

Fig. 15 The case of high holding pressure and stiff supporting condition of mold closing force in usual injection molding ($T_b = 40^\circ\text{C}$, $P_h = 60 \text{ MPa}$, $F_m = 600 \text{ kN}$)

Fig. 18 Two-step compression in injection compression molding

(a) $F_m = 300 \text{ kN}$

(b) $F_m = 600 \text{ kN}$

Fig. 16 The case of flexible supporting condition of mold closing force in usual injection molding ($T_b = 40^\circ\text{C}$, $P_h = 30 \text{ MPa}$)

(a) $P_2 = 15 \text{ MPa}$

(b) $P_2 = 5 \text{ MPa}$

Fig. 19 Mis-transcription distribution in two-step compression process ($T_b = 40^\circ\text{C}$, $P_h = 30 \text{ MPa}$, $F_m = 300 \text{ kN}$)

するため正確な比較はできないが本研究の結果はオーダ的には一致しているといえる。

6. 結 言

成形機の変形、金型のたわみおよび金型キャビティ間隙の変化を測定し、一方ピットの転写不良状態を調べて相互の関係を明らかにした。以下に総括的な結論を要約する。

(1) 本研究の範囲では、転写不良の抑制のためには型締め剛性は低い方がよい。ただし金型温度および保圧についてはそれぞれある程度以上の値に設定することが必要である。射出圧縮成形においても、型締め剛性を低くすることは転写不良を抑制できる圧縮圧力の許容範囲を広げる効果があるものと推測される。

(2) 型締め力を固定側の型板に直接かけることは固定側型板の変形および横ずれを抑制するために必要である。射出圧縮成形においてもそのような構造を採用することが有用である。

参 考 文 献

- 1) 安原鋭幸, 加藤和典, 藤澤直樹, 大竹尚登: 成形加工, **11**(6), 362 (2000)
- 2) 館山弘文, 加藤 毅: 成形加工シンポジア'97, 19 (1997)
- 3) 菅 圭二: 成形加工, **12**(9), 561 (2000)
- 4) 黒崎晏夫, 佐藤 勲, 斉藤卓志: 成形加工, **8**(2), 136 (1996)
- 5) Titomanlio, G. and Jansen, K.M.B.: *Polym. Eng. and Sci.*, **36**(15), 2041 (1996)
- 6) Pantani, R., Jansen, K.M.B. and Titomanlio, G.: *Int. Polym. Proc.*, **12**(4), 396 (1997)
- 7) Jansen, K.M.B., Pantani, R and Titomanlio, G.: *Polym. Eng. and Sci.*, **38**(2), 254 (1998)