

精密射出成形における成形収縮の安定化

Stabilization of Mold Shrinkage in Precision Injection Molding

大丹生 海里^{*1}
Kairi Onyu

前野 耕一^{*1}
Koichi Maeno

亀井 好一^{*2}
Yoshikazu Kamei

佐藤 新治^{*1}
Shinji Satoh

末松 克輝^{*2}
Katsuki Suematsu

〈概要〉

精密射出成形技術における重要因子の一つである成形収縮の安定化を行うため、センサを組み込んだ金型にて精密射出成形品の模擬モデル成形を行い、成形パラメータの変化による型内圧、型内温度および成形収縮への影響を調べた。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 保圧力の増加は樹脂の充填密度を高め、冷却時における樹脂の体積収縮が抑制されることで成形収縮を抑制する効果がある。
- 2) 金型温度の増加は樹脂の冷却速度を低下させ、成形品が常温まで冷却されるまでの時間が長くなり、成形収縮を促進する効果がある。
- 3) 樹脂温度の増加は樹脂の流動性を高め、射出圧力が有効に作用し成形収縮を抑制する効果がある。同時に樹脂の熱が金型温度を上昇させることで成形収縮を促進する効果もあるため、結果的に成形収縮の変動は小さくなる。

これらの結果を基に精密コネクタの成形条件適正化を行ったところ、得られた成形品は目標寸法値に対して誤差±1 μm以内の高い精度を実現できた。

1. はじめに

プラスチック製品の代表的な成形方法の一つである射出成形は、複雑形状の成形品を高い精度で短期間に大量生産することに適しており、非常に多くの分野で活用されている¹⁾。射出成形プロセスにおいて、溶融した樹脂材料は金型内で冷却固化される際、体積収縮(成形収縮)を生じるため、金型は成形品の成形収縮を予測して設計されており、成形品の精度は成形収縮に大きく左右される^{2), 3)}。

サブミクロンレベルの形状精度が要求される光学ディスクやコネクタ等の精密射出成形の分野において、成形収縮の安定化は必要不可欠な要素であるが、成形収縮は材料特性や金型構造に加え、成形中の温度や圧力をはじめとする多くの成形条件の影響を受ける。成形収縮を安定化させるためには試作と評価を繰り返し、成形品の外観や各種評価結果の情報を基に成形条件を適正化していくが、成形条件の適正化は成形品が複雑かつ精密であるほど高度な技術ノウハウが要求される。

成形収縮の安定化に有効な成形条件を設定するためには、金型温度や保圧力などの成形パラメータが成形中の樹脂材料にどのように作用するかを把握する必要があるが、金型内の樹脂の

挙動を直接観察することは困難である。そこで我々は、金型内にセンサを組み込むことで、型内圧や型内温度の挙動から各種成形パラメータによる金型内の樹脂への影響を間接的に調べることを検討した。

本報告では、成形収縮の安定化に向け、成形パラメータの変化による型内圧、型内温度および成形収縮への影響と、これを応用した精密成形品の製作について報告する。

2. 実験

本研究では、精密射出成形品の模擬モデルとして図1に示すコネクタを模した形状の検証用成形品を用いて、金型の製品部にセンサを設置し、成形時の型内圧および型内温度を測定した。また、各種の成形条件下における収縮特性の指標とするため、成形品に2点の穴を設け、その穴ピッチを三次元形状測定機により測定した。

*1 研究開発本部 高分子技術研究所

*2 研究開発本部 ファイテルフォトリクス研究所

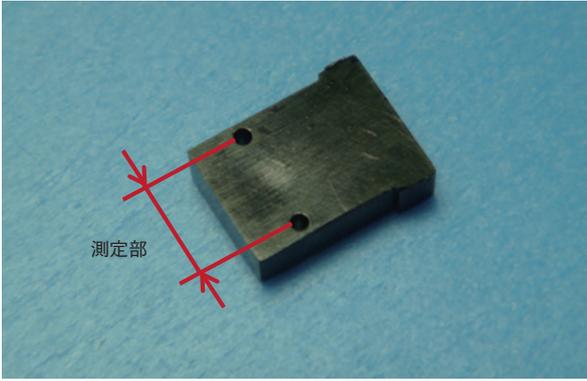


図1 射出成形品
Molding sample.

成形条件は比較的安定して成形できる条件を基準条件とし、成形収縮に大きく影響するとされている金型温度、保圧力に加え、樹脂の流動性に大きく影響するシリンダー温度をそれぞれ大小に変化させた際の成形品の収縮特性、および型内圧、型内温度の変化を調べた。なお、その他の条件は一定とした。

成形収縮は基準条件の成形品における穴ピッチ寸法を基準とし、成形パラメータの変化に伴う穴ピッチ寸法の変化を成形収縮変化量として示す。

3. 実験結果および考察

3.1 保圧力の影響

保圧力を変化させた際の成形品の成形収縮変化量を図2に、型内圧波形および型内温度波形を図3、4に示す。

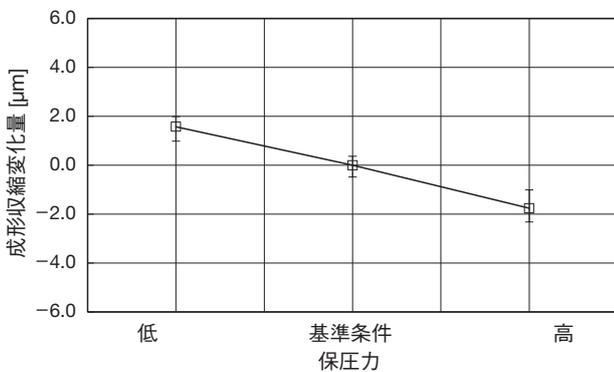


図2 成形収縮に及ぼす保圧力の影響
Effect of holding pressure on the mold shrinkage.

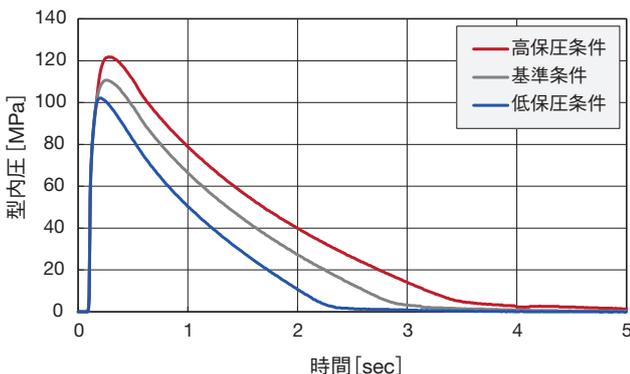


図3 型内圧に及ぼす保圧力の影響
Effect of holding pressure on the pressure in the mold.

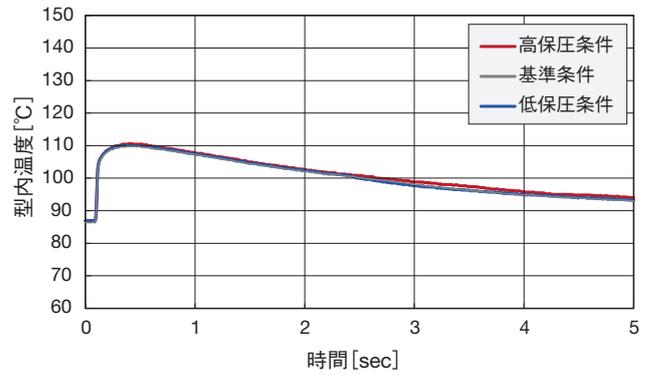


図4 型内温度に及ぼす保圧力の影響
Effect of holding pressure on the temperature in the mold.

図2に示すように、保圧力の増加は成形品の成形収縮変化量を抑える傾向が見られた。

成形中の型内圧は、図3から分かるようにまずセンサに樹脂が到達後型内圧が緩やかに上昇し、型内に樹脂が完全に充填された直後、型内圧は急激に上昇し最大値に達する。その後樹脂の冷却固化に伴い型内圧は下がり始め、ゲートシールを経て大気圧まで低下する。この時、ゲートシールより先に金型が開かれると樹脂の内圧が急激に解放され、ヒケ等の成形不良に繋がる。本成形品の場合、型内圧最大値後の圧力降下は緩やかであり、設定した冷却時間が十分であることが分る。

成形中の型内温度は、センサに樹脂が到達後、温度が急上昇し最大値に達することが図4から分る。その後成形前の温度に向かって緩やかに低下する。

保圧力の増加による型内圧への影響としては、図3に示したように型内圧最大値および樹脂の加圧時間が増加した。一方、型内温度は保圧力の高低に関わらずほぼ同等の結果であった。型内圧最大値の増加は保圧工程において樹脂の充填密度が高められていることを示す。樹脂の充填密度が高いことで冷却時における樹脂の体積収縮が抑制され、その結果成形収縮が小さくなったと考えられる。

3.2 金型温度の影響

金型温度を変化させた際の成形品の成形収縮変化量を図5に、型内圧波形および型内温度波形を図6、7に示す。

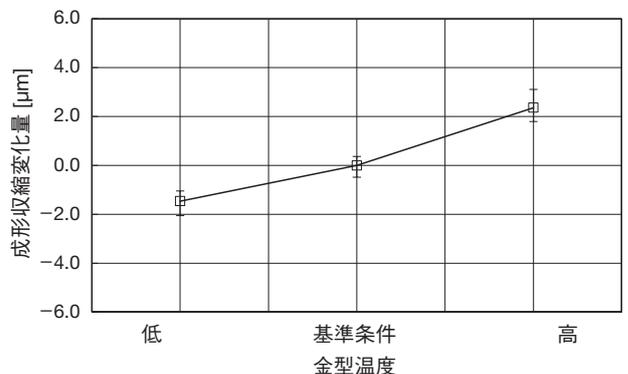


図5 成形収縮に及ぼす金型温度の影響
Effect of mold temperature on the mold shrinkage.

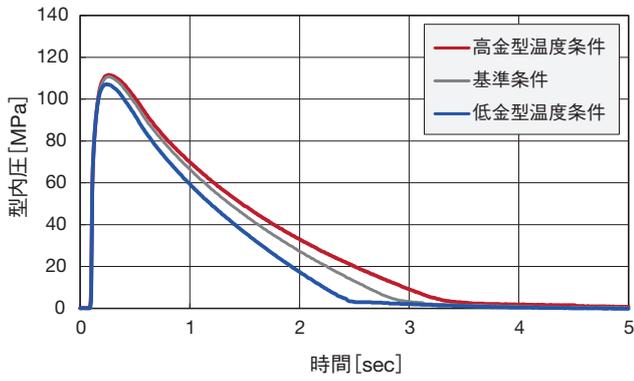


図6 型内圧に及ぼす金型温度の影響
Effect of mold temperature on the pressure in the mold.

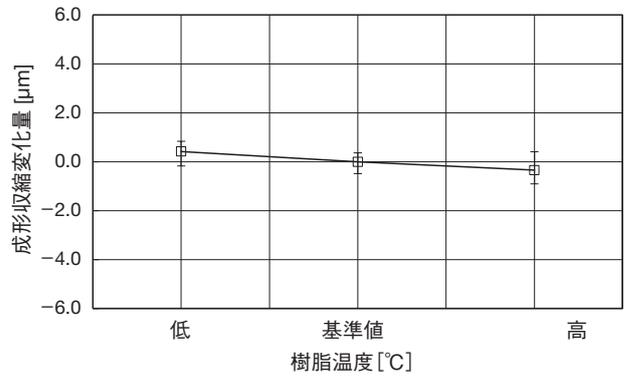


図8 成形収縮に及ぼす樹脂温度の影響
Effect of resin temperature on the mold shrinkage.

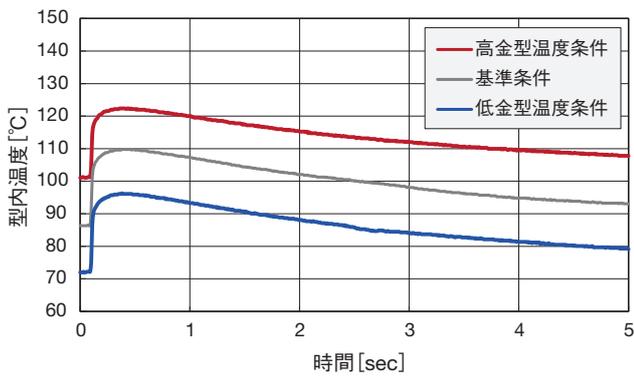


図7 型内温度に及ぼす金型温度の影響
Effect of mold temperature on the temperature in the mold.

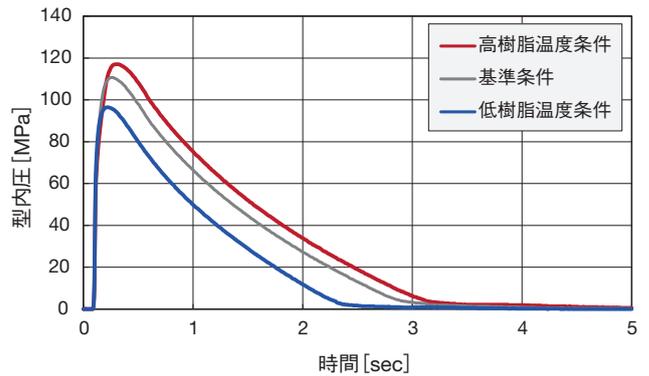


図9 型内圧に及ぼす樹脂温度の影響
Effect of resin temperature on the pressure in the mold.

図5から金型温度の増加は成形品の成形収縮変化量を大きくする傾向が見られた。

図6に示すように型内圧への影響としては、型内圧最大値はほぼ同等の値を示すが、その後の圧力低下速度は金型温度の増加に伴い遅くなる傾向が見られた。金型温度増加に伴う型内圧最大値後の圧力低下速度低下は、冷却速度の低下によるゲートシール時間の遅延を示していると考えられる。

型内温度への影響としては図7に示したように、それぞれの金型温度設定に応じた成形前の温度からほぼ同等の温度上昇を経て緩やかに低下した。金型温度は樹脂の冷却速度、スキン層の形成に大きく影響し、成形収縮を抑制するためには安定したスキン層を形成することが必要とされる。金型温度が高い状態ではスキン層が安定しにくく、樹脂の冷却速度も遅くなる。

成形収縮は、型内に樹脂が充填され成形品表面にスキン層が形成された後、内部の層が常温まで冷却される過程で生じる⁴⁾。従って、比較的高い温度で離型された成形品は自然冷却により常温に達するまでの時間が長くなり、その間収縮は継続される。その結果、成形収縮が大きくなったと考えられる。

3.3 樹脂温度の影響

樹脂温度を変化させた際の成形品の成形収縮変化量を図8に、型内圧波形および型内温度波形を図9、10に示す。

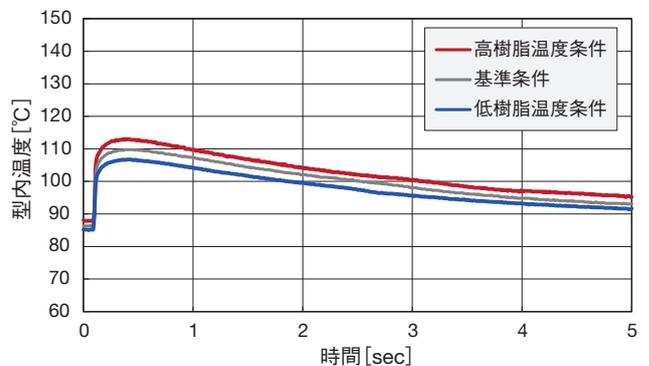


図10 型内温度に及ぼす樹脂温度の影響
Effect of resin temperature on the temperature in the mold.

樹脂温度の影響は保圧力や金型温度と異なり、図8に示したように樹脂温度の低下に伴い、成形品の成形収縮変化量がわずかに増加する傾向を示したもののその変動は小さかった。

しかしながら、図9から分るように型内圧は樹脂温度の増加に伴い最大値が増加し、加えて型内温度も若干増加させる傾向を示すなど、センサ波形では特有の傾向を示した。金型温度を一定値とし樹脂温度を変化させているが、図10に示すとおり型内に充填される樹脂温度の差により、型内温度に若干の変動を生じることが分った。

樹脂温度は樹脂の流動性に影響し、樹脂温度が高い状態では流動性が高くなる。このため、型内へ樹脂が充填しやすく、射出圧力が有効に作用し、型内圧が高くなる傾向を示したと考えられる⁵⁾。型内圧が高い成形は保圧力を増加した場合と同様に成形収縮を小さくする効果を生じると考えられる。ただし、同時に高い樹脂温度が型内温度を上昇させることで金型温度を増加した場合と同様に成形収縮を促進する効果も生じ、結果的に成形収縮の変動が小さくなったとも考えられる。

4. 精密射出成形品への展開

本実験の手法を応用し、より現実的な精密射出成形品として図11に示す精密コネクタの成形を行った。

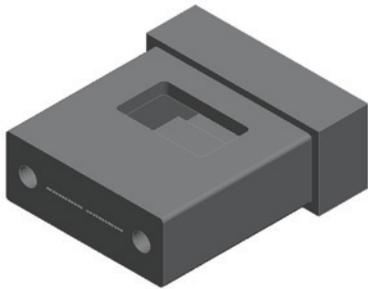


図11 精密コネクタの概略図
Schematic diagram of the precision connector.

実際に精密コネクタを成形するには成形条件の適正化のみでなく、適切な材料選定や金型設計を行う必要がある。材料選定は成形収縮率をはじめとした樹脂の物性や成形性、コストなどを総合的に判断し、精密コネクタ成形に適した熱可塑性樹脂を採用した。金型設計は樹脂の流動をはじめ、メンテナンス性等を十分に考慮し適正な金型構造を設計した。

成形条件の適正化は本実験で取り扱った保圧力、金型温度、樹脂温度に加え、射出速度や冷却時間など射出成形に関する主要なパラメータに対して同様の検証を行った。精密コネクタ成形に関する保圧力、金型温度、樹脂温度をそれぞれ変化させた場合の成形収縮変化量を図12に示す。それぞれの成形パラメータに対する成形収縮の変化は模擬モデルで行った結果が反映されている。

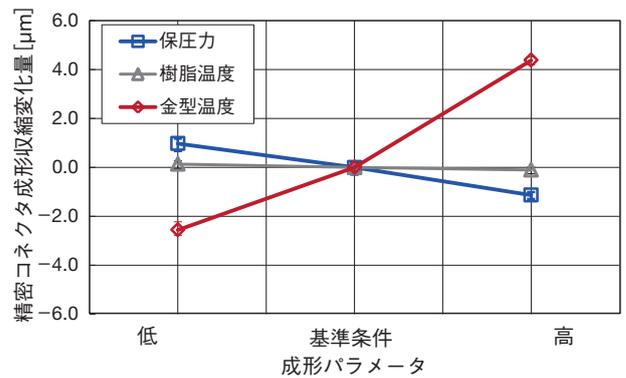


図12 精密コネクタにおける成形収縮に及ぼす各種成形パラメータの影響
Effect of various molding condition on the mold shrinkage in the precision connector.

これらの結果を受け、連続成形性や後収縮についても考慮した成形条件の適正化を行った。適正化した成形条件にて100ショットの連続成形を行い、1ショット目から10ショット毎に抜き取った成形品の寸法を図13に示す。適正化された成形条件の成形品は目標寸法値に対して誤差±1 μm以内の高い精度で成形されており、さらに外観や連続成形性も良好であった。

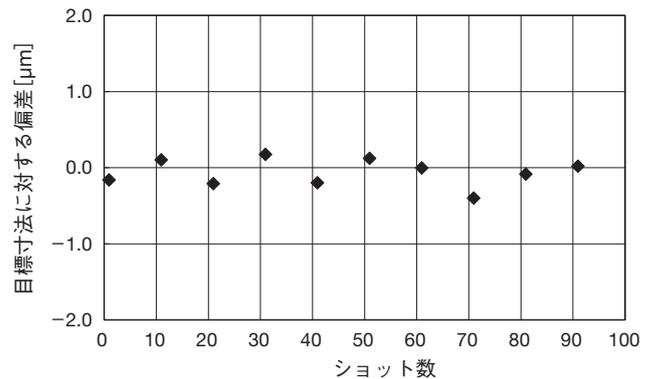


図13 適正化した成形条件による精密コネクタの寸法
Dimension of the precision connector by optimizing molding conditions.

本手法は他の形状の精密射出成形品にも応用でき、各種成形パラメータの収縮への影響度をより詳細にデータベース化することで、将来的にサブミクロンレベルの寸法精度を実現できると考えている。他の樹脂や製品への適用、および精度向上を実現していくためには、樹脂の冷却固化に伴い生じる残留応力や結晶化の挙動について解析し、これを制御していく必要がある今後の課題である。

5. おわりに

成形収縮の安定化に向け、精密射出成形品の模擬モデルにて成形パラメータの変化による型内圧、型内温度および成形収縮への影響を調べた。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 保圧力の増加は樹脂の充填密度を高め、冷却時における樹脂の体積収縮が抑制されることで成形収縮を抑制する効果がある。
- 2) 金型温度の増加は樹脂の冷却速度を低下させ、成形品が常温まで冷却されるまでの時間が長くなり、成形収縮を促進する効果がある。
- 3) 樹脂温度の増加は樹脂の流動性を高め、射出圧力を有効に作用し、成形収縮を抑制する効果がある。ただし、それと同時に樹脂の熱が金型温度を上昇させることで成形収縮を促進する効果もあるため、結果的に成形収縮の変動は小さくなる。

以上の結果を基に、精密コネクタの成形を行ったところ、得られた成形品は目標寸法値に対して誤差 $\pm 1 \mu\text{m}$ 以内の高い精度を実現した。

他の樹脂や製品への適用、および精度向上を実現していくためには、樹脂の冷却固化に伴い生じる残留応力や結晶化の挙動について解析し、これを制御していく必要があり今後の課題である。

参考文献

- 1) プラスチック成形加工学会編：先端成形加工技術, (1999), 39.
- 2) 大柳康：エンジニアリングプラスチックの最新成形・加工技術, (1987), 87.
- 3) 日本プラスチック加工技術協会編：エンジニアリングプラスチックの射出成形技術, (1981), 10.
- 4) 今泉賢, 小川瑞樹, 北山二郎, 横井秀俊：冷却速度制御による精密射出成形法の開発 第1報 PPS円筒形状部品における収縮特性の制御, 成形加工, 22 (2010), 591.
- 5) 瀬戸雅宏, 和田卓也, 佐藤和人, 岡田有司, 山部昌：射出成形過程の固化層成長に与える成形条件の影響, 成形加工, 19 (2007), 591.