

冷却速度制御による精密射出成形法

今泉 賢* 佐久間利幸***
小川瑞樹*
北山二郎**

Precision Injection Molding by Cooling Rate Control

Masaru Imaizumi, Mizuki Ogawa, Jiro Kitayama, Toshiyuki Sakuma

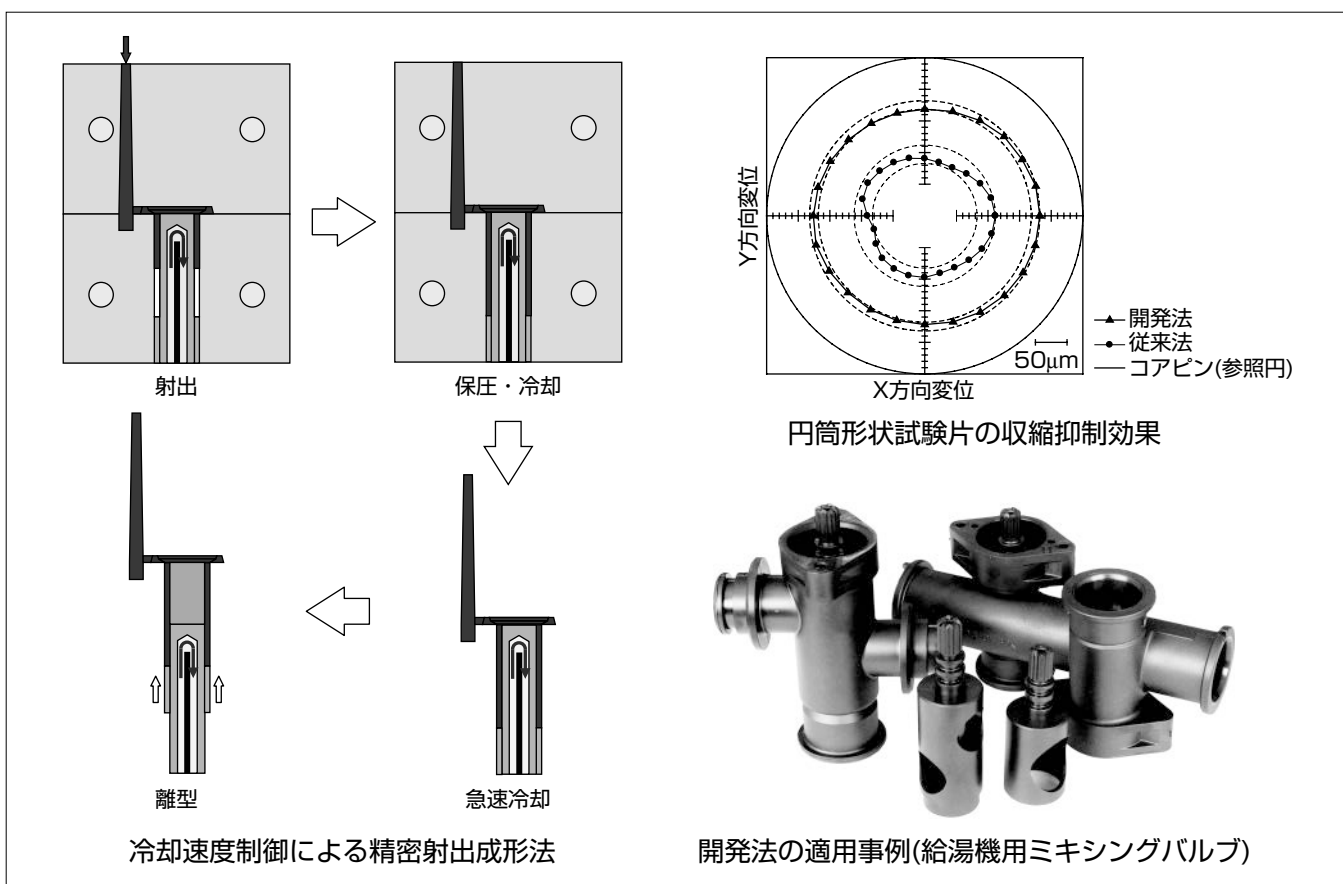
要 旨

近年、製品の軽量化や低コスト化が求められる中、機械的強度や耐熱性などの理由で、従来、金属を使用していた部品を、エンジニアリングプラスチックなどの高剛性、高耐熱性を持つ樹脂への代替が進められている。樹脂は複雑な三次元形状部品でも効率良く安価に成形できる反面、成形に伴う収縮が避けられないために高い寸法精度を実現するのが難しく、樹脂化の大きな支障になっていた。そこで三菱電機では樹脂の収縮を抑制することで精度の向上を図る“冷却速度制御による精密射出成形法”を開発した。

この成形法は、まず金型を樹脂に応じた適正な温度に加熱しておき、樹脂を射出した後、所定の時間この温度に保持させて樹脂の結晶化を促進させる。その後、精度が求められる特定の成形品面を金型に保持させた状態で急速冷却

し離型する。このように、開発した方法(以下“開発法”という)は、冷却速度を積極的に制御することで、結晶成長と応力緩和を促進させ、同時に離型後の熱収縮を抑制して成形精度を向上させる手法である。

本稿では、開発法と従来法で成形した各種樹脂の収縮特性と結晶化度を調査し、収縮抑制効果が得られる条件を明らかにする。また、高精度化のメカニズムを解明するために、成形過程における応力の発生と緩和を考慮した粘弾性モデルによって成形品の収縮量を数値解析し、解析と実験の結果が良好に一致することを確認する。さらに、この成形法の適用事例としてPPS(ポリフェニレンサルファイド)製の給湯機用ミキシングバルブについて述べる。



金属から樹脂への代替を可能にした冷却速度制御による精密射出成形法とその適用事例

冷却速度制御による精密射出成形法の開発によって、機械加工法並みの成形精度を実現した。この成形法は、冷却速度を適正に制御することで、結晶化度と成形精度を両立させることができる手法である。また成形過程に発生する応力を積極的に緩和させることができるため、寸法安定性に優れた部品を成形することが可能であり、流体制御弁や機構部品などの当社製品で広く適用している。

1. ま え が き

近年、製品の軽量化や低コスト化が求められる中、機械的強度や耐熱性などの理由で、金属を使用していた部品に対してエンジニアリングプラスチックなどの高剛性、高耐熱性を持つ樹脂への代替が進められている。部品の精度は製品の機能や品質を左右する重要な要素となるため、これまで金属部品の多くは機械加工法で仕上げられ、精度が保証されてきた。一方、樹脂部品の多くは射出成形法によって成形される。複雑な三次元形状でも効率良く安価に成形できる反面、樹脂の収縮が伴うために機械加工法並みの精度を実現するのは難しく、結果的に成形後の仕上げ加工が必要となり樹脂化の大きな支障になっていた。

そこで、樹脂の収縮現象に着目し、収縮原因を排除することで精度の向上を図る“冷却速度制御による精密射出成形法”を開発した。これによって、射出成形品であっても仕上げ加工することなく金属部品と同等の寸法精度を可能にした。

本稿では、開発法で成形した各種樹脂の収縮特性と高精度化メカニズムについて述べる。また、この成形法の適用事例として、給湯機の流体制御弁について述べる。

2. 冷却速度制御による精密射出成形法の開発

金型を常温に設定し、成形品をできる限り冷却すれば、離型後の熱収縮を最小限に抑制できる。しかし結晶性樹脂を急速に冷却すると結晶化が十分に進行しないため、本来の特性が得られず、また不安定な状態で残留した非晶部分がその後再結晶化することで精度の悪化を招く。そこで、“冷却速度制御による精密射出成形法”を開発した⁽¹⁾。

この成形法の特徴は、精度を求める特定の成形品面だけを金型で拘束しながら局所的に急速冷却するところにある。図1に工程を示す。ここで例示するのは後述する実験で用いた円筒形状試験片であり、試験片の内周面に高い精度を求めることを前提としている。まず、温調機を使って所定温度に加熱した金型に樹脂を射出する。この時の金型温度は樹脂に応じて適正な温度(初期金型温度： T_M)に設定する。金型を T_M に保持させたまま次の保圧・冷却工程に移行し、この間に樹脂の結晶化を促進させる。そして所定の

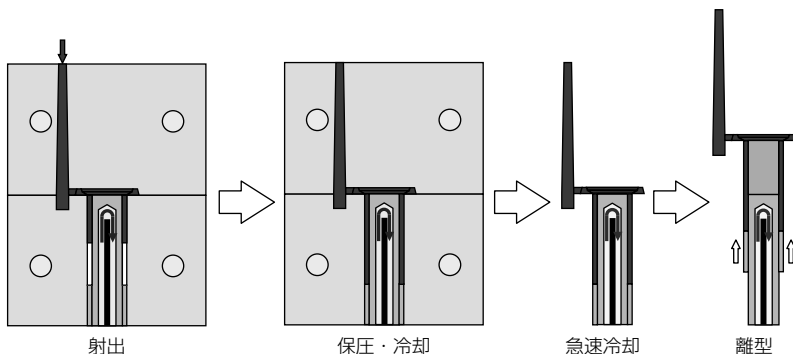


図1. 冷却速度制御による精密射出成形法の工程

時間(本稿の実験では冷却工程を開始してから10秒間)経過した後、成形品を金型に保持させた状態で円筒内周面を形成するコアピンを10℃の冷却水で急速冷却する。これによって成形品を局所的に冷却し、離型する。これらの一連の工程によって、金型で保持する部位の離型後の収縮を抑制して精度を向上させる手法である。

3. 各種樹脂の収縮特性と高精度化メカニズム

3.1 開発法の収縮抑制効果

図2にPPSで成形した単純円筒形状試験片(内径20mm, 外径26mm, 高さ60mm)の収縮抑制効果を示す。開発法と従来法で成形した試験片について、深さ40mmの円筒内周面を三次元測定した結果である。なお T_M は140℃, 冷却時間は30秒とした。この図は金型のコアピンからの収縮量を図中のスケールに拡大して表示している。開発法の方は明らかに収縮が抑制され、平均内径で算出した収縮率は従来法の1.53%から0.75%に半減した。また、真円度を比較すると、従来法は円の形が歪(ひず)んでおり、29.0 μ mとなっている。一方開発法は収縮が抑えられているため周方向の収縮ばらつきが小さく、真円度は13.8 μ mに向上している。このように開発法は、収縮の抑制と同時に形状精度(ここでは真円度)の向上に有効である。

3.2 円筒形状試験片の収縮特性

開発法で T_M は冷却速度を決定する重要なパラメータとなり、特に結晶性樹脂の場合は結晶成長と収縮特性に大きな影響を与えると考えられるため、この円筒形状試験片を用いて内径の平均収縮率に及ぼす T_M の影響を調査した。ここでは結晶性樹脂の中から代表的なPPS, PBT(ポリブチレンテレフタレート), POM(ポリアセタール)を選び、開発法と従来法の収縮率を比較した。なお冷却時間は60秒とした。まず図3(a)にPPSの結果を示す。開発法は T_M によらず一定の収縮率を示すが、従来法は T_M が高いほど離型後の収縮が大きくなるため、収縮率が高くなる傾向を示す。この差が開発法の収縮抑制効果である。しかし、 T_M が90℃を下回ると開発法と従来法の収縮率差がなくなった。この境となる温度はPPSのガラス転移温度($T_g=92^\circ\text{C}$)に一致し、 T_g が収縮特性に影響を及ぼしていると考えられる。

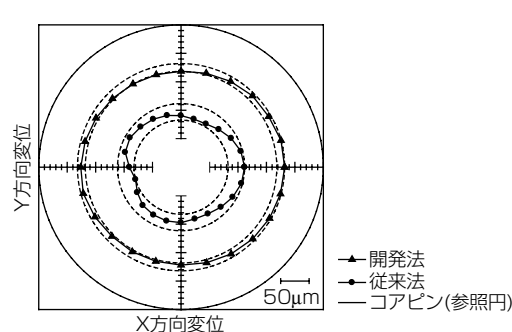


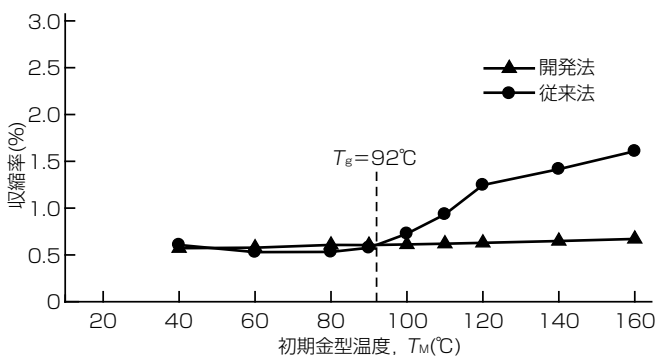
図2. PPS円筒形状試験片における円筒内周面の三次元測定結果

また、図3(b)にPBTの結果を示す。PPSと同じようにPBTの $T_g (=22^\circ\text{C})$ を境にして収縮率に差が現れた。しかし、 T_g が常温未満のPOM($T_g = -50^\circ\text{C})$ については、図3(c)に示すように収縮特性の境となる温度は必ずしも T_g に一致せず、収縮率の差は常温付近から T_M の上昇に伴って徐々に現れた。

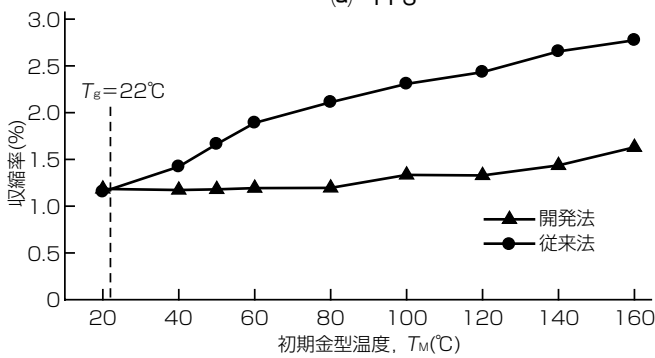
この収縮特性は他の樹脂でも確認されている⁽²⁾。したがって、開発法によって収縮抑制効果が得られる条件は、① T_g が常温以上の樹脂は“ T_M が T_g 以上”であり、② T_g が常温未満の樹脂は“ T_M が常温以上”であることが明らかになった。

3.3 結晶化度に及ぼす初期金型温度の影響

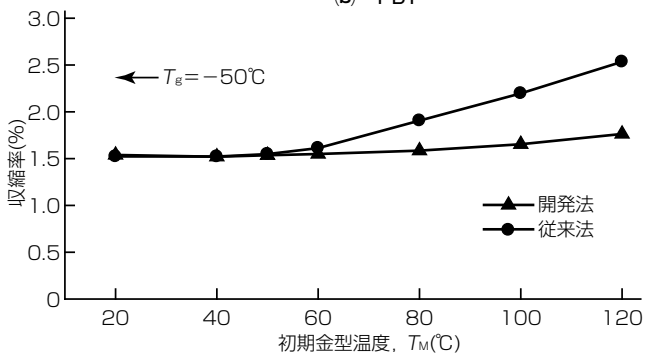
2章で述べたように、結晶性樹脂を急速に冷却すると結晶化の進展が阻害される。したがって、成形途中で急速冷却する開発法は、結晶化度に対して悪影響を及ぼすことが懸念されるため、PPSの円筒形状試験片を用いて肉厚方向の相対結晶化度分布を確認した。この結果を図4に示す。 T_M を 140°C 、 120°C 、 90°C 、 40°C に設定し、開発法と従来法を比較すると、 T_M が同じ条件であれば両者に相対結晶化度の差はほとんど確認されなかった。しかし、 T_M が



(a) PPS



(b) PBT



(c) POM

図3. 各種樹脂の収縮特性

90°C 以下になると、どちらの方法も金型に近い表層部では十分に結晶化されていないことが分かった。したがって、結晶化を十分に促進させるには T_M を 120°C 以上に設定する必要があるが、3.2節で示したように従来法では収縮が大きくなるため、成形精度が悪化する。しかし、開発法を適用することで成形精度と結晶化度を両立させることができる。

3.4 粘弾性モデルに基づく収縮メカニズムの解明

この実験で明らかになった特徴的な収縮特性は、樹脂の粘弾性を考慮した単純Maxwellモデルを用いて説明できる。これは樹脂の収縮を表現する要素に、弾性率 E のばねと粘度 η のダッシュポットを直列に接続したモデルである。

まず、図5(a)に離型時の樹脂温度(T_e)が樹脂の T_g より高い従来成形法の場合の収縮挙動を示す。射出後、冷却の進行に伴って樹脂要素が収縮すると、これに追従してばねが伸び、モデルに応力が作用する。そしてこの応力の一部はダッシュポットで緩和される。このように樹脂要素の収縮

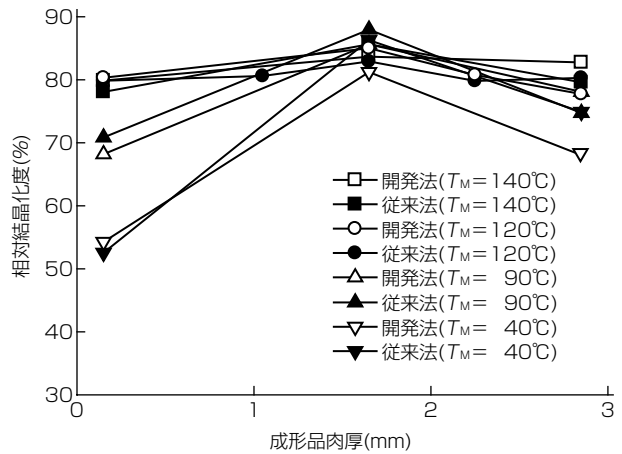


図4. PPS円筒形状試験片における肉厚方向の相対結晶化度分布

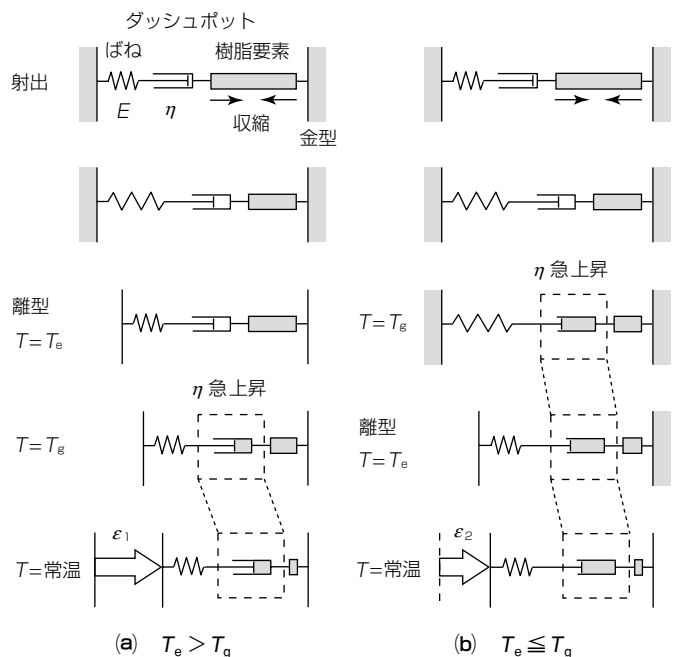


図5. 粘弾性モデルによる収縮メカニズム

に伴って応力の発生と緩和が同時に進行する。そして離型によって金型の拘束が解除されると、引き伸ばされていたばねは自然長まで復元する。その後は常温まで冷却される過程で、樹脂要素だけが線膨張係数に依存して熱収縮する。したがって、両者の和が成形品の収縮量 ε_1 となる。

次に、図5(b)に T_M が T_g 以下の場合を示す。これは開発法又は T_M が T_g 以下の従来法の場合に該当する。図5(a)と同様に樹脂が冷却されながら、応力の発生と緩和が同時に進行する。しかし、 T_g まで冷却されるとダッシュポットの粘度が急上昇する。そのため、以後は応力緩和しにくくなり、樹脂要素の収縮はばねの伸びに置き換わる。そして離型に伴ってばねが復元し、さらに、常温まで冷却される過程で樹脂要素が熱収縮する。この和が成形品の収縮量 ε_2 となる。つまり T_g 以下で発生する樹脂要素の収縮量は、一時的にばねに保存されるものの離型時にばねが復元するために、 ε_2 は T_c に依存せず一定となる。また、図5(a)の ε_1 と比較すると、熱応力がダッシュポットでより緩和され、さらに、離型後の熱収縮量が抑制される分だけ ε_2 は小さくなる。

この収縮メカニズムを実証するために、粘弾性モデルに基づいて円筒形状試験片の収縮量を数値解析し、実験結果と比較した。なお、モデルを構成するばねの弾性率 E とダッシュポットの粘度 η は、動的粘弾性測定で得られた値を用いた。図6にPPSの結果を示す。数値解析と実験の結果はほぼ一致している。また、PBTやPOM等でも良好に再現されていることも確認した⁽³⁾。このように開発法は、冷却速度を積極的に制御することで応力緩和を促進させて、離型後の熱収縮を抑制する手法であることを明らかにした。

4. 開発法の適用事例

開発法の適用事例として、ここでは給湯機用の流体制御弁について述べる。図7はミキシングバルブと呼ばれる部品であり、給湯機で沸き上げた湯と水をリモコンの設定温度に応じて混合するためのものである。従来のバルブは青銅製で、精度の高い複数の部品で構成されていた。しかし、一般的に給湯機のような水回りの部品に金属を用いると、腐食の問題が避けられない。そこで、樹脂を射出成形できるように構造を簡素化してPPS製のバルブを開発した。PPSは先に述べたとおり T_g が 92°C の結晶性樹脂なので、熱水中でも耐熱性や耐腐食性がある樹脂である。このバルブは、湯と水の導入口を設けたボディに円筒形状の弁体を挿入し、モータで回転させる構造である。弁体には穴が設けられ、湯と水の開口比を回転位置によって制御することで、設定温度の湯を供給できる仕組みになっている。しかし、高い温度制御性を実現するためには、ボディと弁体の円筒部分に数十 μm レベルの真円度を必要とする。構造を簡素化したとは言え部品は非対称形状であるため、従来の成形法では数百 μm 程度が限界であったが、開発法を適用すること

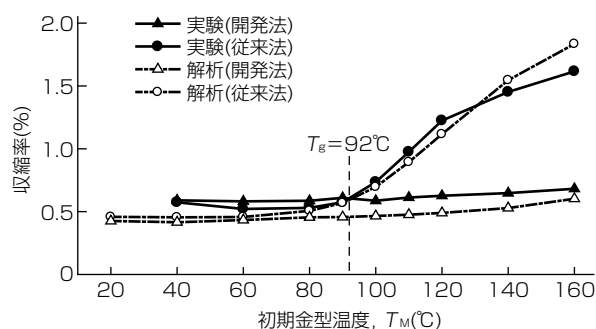


図6. 粘弾性モデルに基づくPPS円筒形状試験片の収縮解析結果と実験結果の比較



図7. 開発法の適用事例

でこれをクリアした。さらに、成形過程で発生する応力を積極的に緩和させることができるため、バルブに熱水を通水させても経時変形することなく、寸法安定性に優れている。

5. むすび

冷却速度制御による精密射出成形法とその適用事例について円筒形状部品を中心に述べたが、これに限定されるものではない。例えばコの字型成形品の側壁の倒れや箱型成形品の内反りなどに対しても効果があることは示されており、開発法は既に様々な部品に適用されている。また、この開発で明らかにした金型内の収縮メカニズムによって、流動解析シミュレーションにおける反り変形解析の高精度化が期待できる。今後も樹脂の収縮変形現象を解明し、更なる高精度成形技術の開発に取り組んでいく。

参考文献

- (1) 今泉 賢, ほか: 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**, No.10, 590~597 (2010)
- (2) 今泉 賢, ほか: 冷却速度制御による精密射出成形法の開発(第2報) 各種樹脂で成形した円筒形状部品の収縮特性, 成形加工, **25**, No.1, 37~45 (2013)
- (3) 今泉 賢, ほか: 冷却速度制御による精密射出成形法の開発(第3報) 粘弾性モデルによる円筒形状部品の収縮メカニズムの解明, 成形加工, **25**, No.10, 493~503 (2013)