

## 射出成形における離型抵抗計測金型の開発

日本工業大学 基幹工学部機械工学科:村田泰彦

## 1. はじめに

プラスチック射出成形は、光学やエレクトロニクス分野などにおけるナノ・マイクロオーダーの形状・寸法精度が要求される製品の製造に用いられている。その際、金型に設けられた微細形状の、樹脂への精密転写が重要となっている。成形品への金型キャビティ面の転写性を高めて、形状と寸法精度、表面性状を向上させようとする、逆に、エジェクタピンなどによる成形品の突き出し時に離型抵抗が増加するため、成形品に変形や割れ、傷などが発生することが問題となっている。そのため、高い転写性を保ちつつ離型抵抗を低減させる方法が検討されている。例えば、離型し易いキャビティ面性状への調整や離型膜のコーティング、離型剤の樹脂への添加やキャビティ面への塗布などが行われている。一方、上記方法による効果の評価が重要と考えられ、様々な離型抵抗の計測金型が提案され、データが報告されている<sup>1)~3)</sup>。離型抵抗は、キャビティ面と成形品との界面における掘り起こしやメニスカス力、真空圧、分子間力などの因子が複雑に絡み合っ発生するものと考えられている。従来の離型抵抗の計測データは、カップなどの複雑な形状の製品を対象としたキャビティで計測されたものであり、上記因子による影響が重畳されている。そのため、各因子が、離型抵抗にどのくらいの影響を及ぼしているのかが明らかにされていない。離型抵抗を詳細に評価するには、各因子をできるだけ分離してそれぞれの影響を個別に評価することが必要不可欠と考えられる。図1は、離型抵抗を分類したものである。一つは、(1)の成形品が貼り付いているキャビティ面に対して直交方向に発生する離型抵抗であり、この場合は、メニスカス力、真空圧などが主な発生原因と考えられる。もう一つは、(2)の成形品が貼り付いているキャビティ面に沿って発生する離型抵抗で、例えば、円筒形状成形品の内面やリブの側面に発生する。この場合は、掘り起こしやメニスカス力、真空圧などが主な発生原因と考えられる。著者らは、これまでプラスチックレンズで問題となっている(1)の離型抵抗を評価するために、図2に示す離型抵抗計測金型を設計・製作して、成形条件などが離型抵抗に及ぼす影響を明らかにしてきた<sup>4)</sup>。

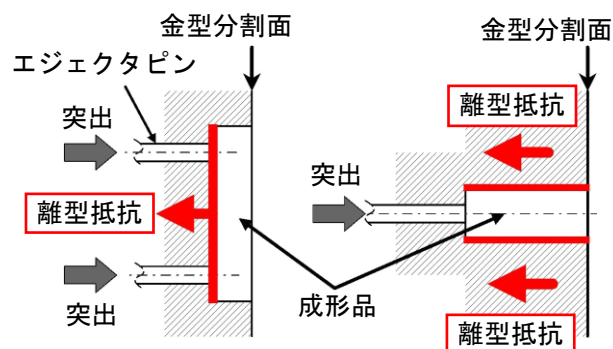
## 2. 目的

本研究では、成形品が貼り付いているキャビティ面に沿って発生する離型抵抗を、力センサおよびひずみセンサ、樹脂圧力センサを用いて詳細に評価することができる新しい離型抵抗計測金型を設

計・製作すること、計測実験を通じて、本金型の実用性の評価を行うことを目的としている。

## 3. 実用的な価値、実用化の見込など

射出成形金型に生じる離型抵抗は、成形品に様々な不良をもたらすために問題となっている。そのため、離型し易いキャビティ面性状への調整や離型膜のコーティング、離型剤の樹脂への添加やキャビティ面への塗布などが行われてきた。ただし、1項で述べたように、離型抵抗は、キャビティ面と成形品との界面における掘り起こしやメニスカス力、真空圧、分子間力などの様々な因子の影響が重畳されて発生するため、上記対策の詳細な評価が困難な状況となっている。本研究で設計・製作した計測金型は、上記因子をできるだけ分離してそれぞれの影響を個別に評価することを可能としている。本金型の構造や計測方法は、これから離型抵抗計測金型の開発を行おうと考えている研究者や技術者に対して、計測金型の設計指針を与えるものとする。また、本金型を用いて得られる知見は、離型性を向上させるための金型キャビティ表面の性状や離型膜、外部充填形あるいは内部充填形離型剤などの開発に大きく寄与するものと期待される。



(1) 成形品面に直交方向 (2) 成形品面に直交方向

図1 離型抵抗の分類

図2 成形品面に直交方向の離型抵抗の計測金型<sup>4)</sup>

#### 4. 研究内容の詳細

##### 4.1 計測金型

本研究で設計・製作した離型抵抗計測金型の構造を図3に示す。また、図3から離型抵抗計測部を抜き出して図4に拡大して示す。さらに、本金型の外観を図5に示す。本金型では、金型可動側に離型抵抗計測部が設けられている。矩形状キャビティが金型分割面に対して垂直方向に設けられており、キャビティ面に沿って発生する離型抵抗を計測する。具体的には、平板キャビティの底面に設置された角形エジェクタピンが成形品を突き出す際に発生する力を離型抵抗として、ピンを介して力センサによって計測する原理となっている。

図6は、成形品をエジェクタピンで突き出す際に、成形品とキャビティ面に作用する力を示している。成形品が貼り付いているキャビティ面に対して平行方向に発生する離型抵抗は、キャビティ面と成形品との界面における掘り起こしやメナスカス力、真空圧などによって支配されている。掘り起こしの程度は、突出直前にキャビティ面に作用している成形品内部の残留圧力の反力である垂直抗力に比例する。また、メナスカス力は、キャビティ面と樹脂との間の距離に反比例し、さらに、距離は残留圧力に反比例するため、メナスカス力は残留圧力に比例する。すなわち、メナスカス力も垂直抗力に比例する。以上より、離型抵抗を検査するためには、垂直抗力を

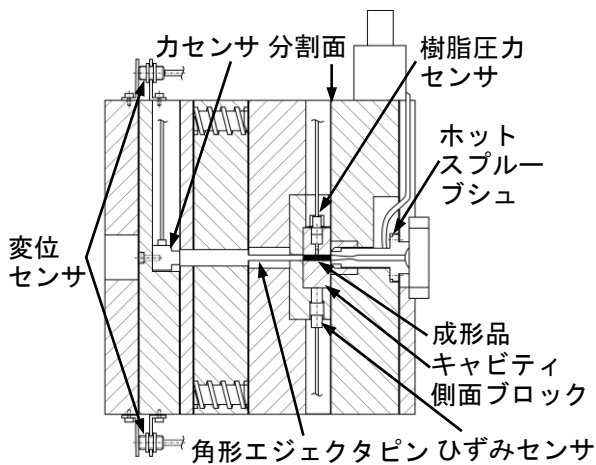


図3 離型抵抗計測金型の構造(断面図)

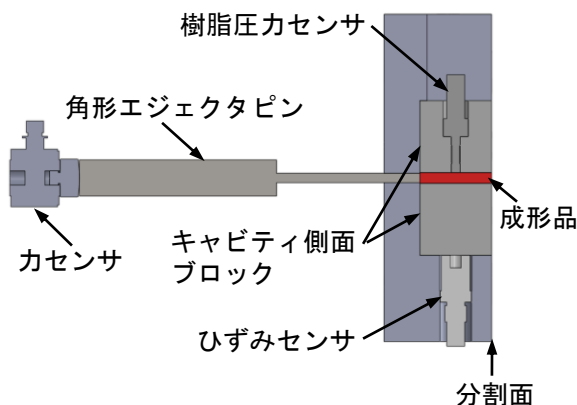


図4 離型抵抗計測部の構造

把握することが重要と考えられる。しかし、従来の研究<sup>1)~3)</sup>では、垂直抗力の定量的な評価が行われてこなかった。これは、キャビティ側面への樹脂圧力センサの挿入が困難であること、たとえ挿入できても、キャビティ面に露出したセンサ先端がキャビティ面に対して面一になっていない場合には、凹凸が離型抵抗に誤差を生じさせることが懸念されたためである。そこで、本研究では、キャビティ側に設けられたブロックの後方にひずみセンサを挿入してブロックの微小変形を計測することで、キャビティ面を害することなく、垂直抗力を求めることとした。具体的には、図4に示すように、一方のキャビティ側面ブロックに樹脂圧力センサを、対向するキャビティ側面ブロックの後方にひずみセンサを挿入して、成形工程において樹脂圧力とひずみを計測し、予め両者の較正関係を求めておく。そして、実際の離型抵抗計測時には、樹脂圧力センサが挿入されていないキャビティ側面ブロックに交換して、離型抵抗とひずみを計測し、上記較正関係から、離型抵抗と垂直抗力の関係の考察を行う。なお、ひずみセンサは、実際にはキャビティ側面ブロックとセンサが取り付けられたブロックの両方のひずみを検出しているが、本研究では、便宜的に、キャビティ側面ブロックのひずみと呼称することにする。

図7にキャビティ側面ブロックの外観を示す。本側面ブロックは、交換可能な構造となっている。そのため、キャビティ面の粗さや形状、ダイヤモンドライクカーボン(DLC)などの各種離型膜における離型抵抗の評価ができる。なお、本実験では、研削加工面(Sa0.329 μm)のブロックを用いて計測を行った。

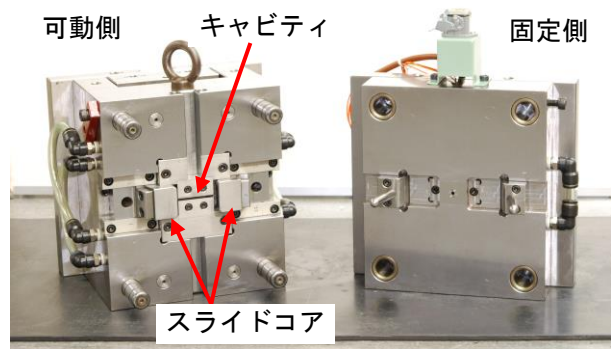


図5 離型抵抗計測金型の外観

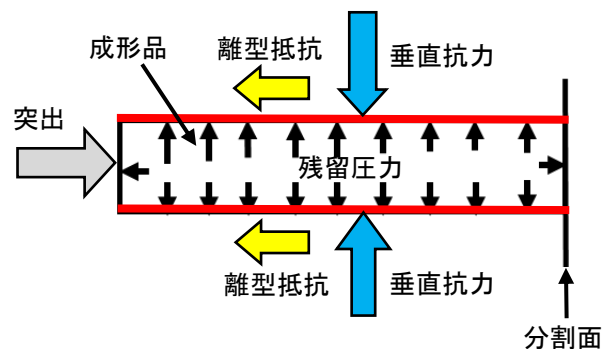


図6 成形品突出時に成形品とキャビティ面に作用する力

矩形平板成形品では、囲まれた4つのキャビティ面に離型抵抗が発生する。本金型では、図8に示すようなアンギュラーピンを用いたスライドコア機構を採用しており、成形品の突出時に、キャビティ側面ブロックに接する2つの成形品面にだけに離型抵抗が発生する構造となっている。

型開開始時に、スプルー部とスプルーブッシュとの間に離型抵抗が発生し、スプルーがとられ、突き出し前に、成形品の離型が始まるのが懸念された。そこで、ホットスプルーブッシュ(H-HBS45S10, 双葉電子工業(株))を設置して、型開開始時に生じるスプルー部の離型抵抗を低減している。

図9にキャビティ形状を示す。キャビティは、幅40×長さ20mm×厚さ3mmの矩形形状で、抜き勾配は設けられていない。ホットスプルーブッシュの先端部にあたる位置に、9.5mmのわずかなスプルー部が残る形状となっている。樹脂圧力を計測する場合は、キャビティの中心Aにセンサが挿入される。

#### 4.2 実験方法

離型抵抗とキャビティ側面ブロックのひずみの計測には、図10に示す水晶圧電式力センサ(9313AA2, 日本キスラー合同会社)と水晶圧電式ひずみセンサ(9243B, 同上)を用いた。また、樹脂圧力の計測には、水晶圧電式樹脂圧力センサ(6159A, 同上)を用いた。さらに、図3に示すように、エジェクタプレートの上下部に、渦電流式変位センサ(EX-110V, (株)キーエンス)を取り付けて、成形品の突出開始タイミングの計測を行った。



図7 キャビティ側面ブロックの外観

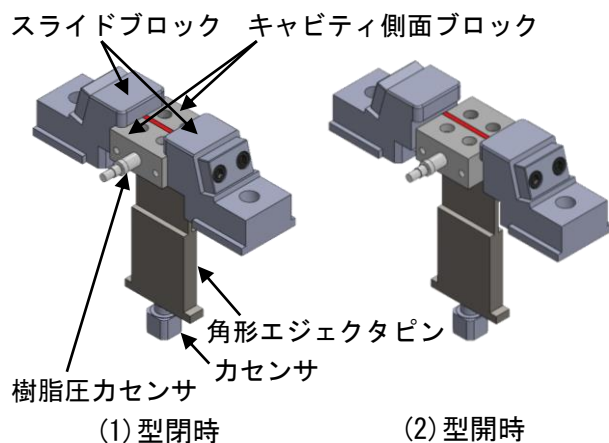


図8 スライドコア機構

表1に成形条件を示す。実験には、全電動式射出成形機 ROBOSHOT α-50iAP(ファナック(株), 最大型締力 500kN, スクリュ直径 26 mm)を使用した。成形材料は、汎用ポリスチレン GPPS(CR-2500, DIC(株))を使用した。本実験では、保持圧力を0から100MPaまで10MPaごとに変化させて射出成形を行い、各センサの出力をマルチデータ入力データシステム(NR-500, (株)キーエンス)に記録した。成形品の外観を図11に示す。

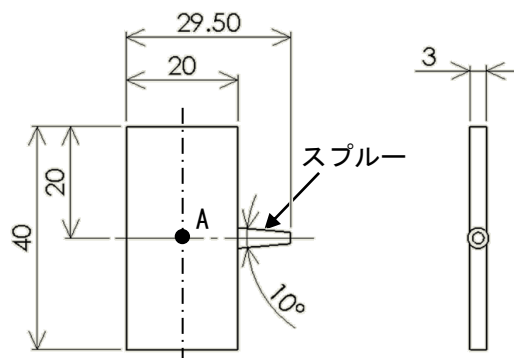


図9 キャビティ形状(単位:mm)



図10 各種センサの外観

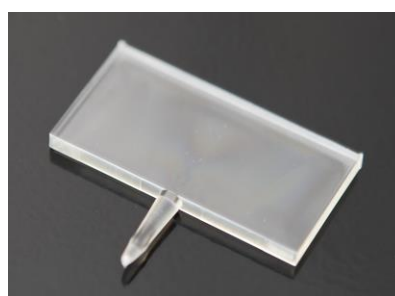


図11 成形品の外観(汎用ポリスチレン GPPS)

表1 成形条件

樹脂温度 <sup>※)</sup>	[°C]	210-210-200-190-180-50
射出率	[cm <sup>3</sup> /s]	26.5
金型温度	[°C]	50
保持圧力	[MPa]	0/10/20/30/40/50/ 60/70/80/90/100
保圧時間	[s]	10
冷却時間	[s]	20
突出速度	[mm/s]	20

※) ホットスプルー部-ノズル部-計量部-圧縮部-供給部-ホッパー

### 4.3 実験結果

保持圧力を変化させて成形を行い、射出開始から保圧、冷却、型開、そして、成形品の突出に至るすべての工程における各センサの出力を記録した。保持圧力 90MPa における結果を一例として図 12 に示す。成形機から出力された射出圧力も併記した。射出開始と同時に、射出圧力および樹脂圧力、力センサ出力、ひずみが立ち上がり、その後、保圧・冷却工程において各出力が緩やかに低下し、型開が開始すると急激に低下している。ただし、型が開いても、樹脂圧力と力センサ出力、ひずみは、0 には戻らずほぼ一定の値を保持している。すなわち、成形品内部には残留圧力、キャビティ側面ブロックには残留ひずみが生じていることがわかる。その後、エジェクタピンによる突出が開始され、離型抵抗が出力され、一方、残留圧力と残留ひずみは低下する。つぎに、樹脂圧力センサが挿入されていないキャビティ側面ブロックを金型に設置して計測した計測結果の中から、成形品の突出開始から離型までの出力を拡大表示して図 13 に示す。なお、力センサ出力は、離型抵抗と表記した。まず、離型抵抗は、成形品の突出開始時に急激に増加し、突き出しが進むに伴い徐々に減少し、成形品が完全にキャビティから抜けると 0 に戻る。なお、高い保持圧力条件において突出開始前から離型抵抗が出力されているのは、キャビティ底面のエジェクタピン上にも残留圧力が作用しているためと推察される。保持圧力の増加に伴い、離型抵抗は増加している。一方、ひずみの波形では、残留圧力によってキャビティ側面ブロックが変形し、突出開始前から残留ひずみが生じている。そして、突出開始とともにわずかに増加した後、成形品がキャビティから抜けると 0

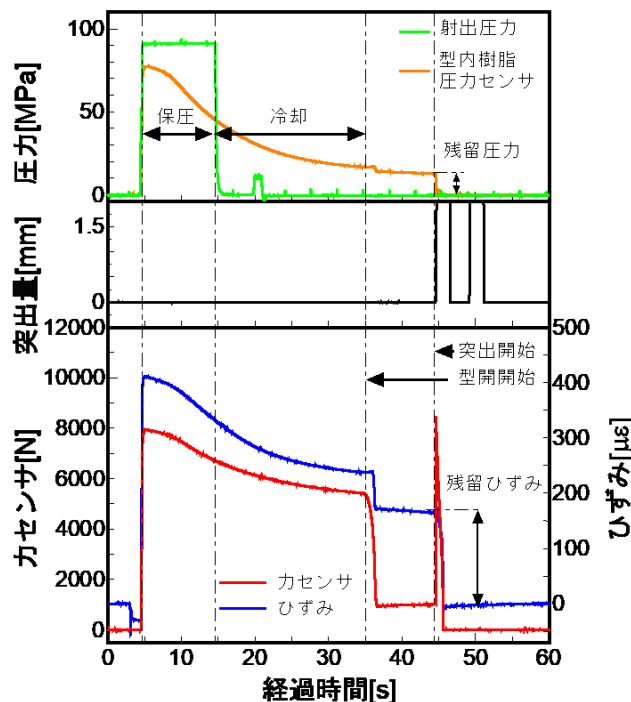


図 12 各種センサ出力の経時変化 (保持圧力 90MPa)

に戻っている。保持圧力の増加に伴い、残留ひずみは増加している。

図 13 より、各保持圧力における離型抵抗の最大値と、残留ひずみを抽出して図 14 に示す。保持圧力の増加に伴い、最大離型抵抗と残留ひずみとともに増加している。また、60MPa 以下の保持圧力条件では、両者ともに緩やかに増加し、70MPa 以上では、急激に増加するなど、最大離型抵抗と残留ひずみには、相関関係が見られる。図 15 に最大離型抵抗および残留圧力と保持圧力の関係を示す。なお、残留圧力は、樹脂圧力センサが挿入されたキャビティ側面ブロックを設置して、最大離型抵抗とは別に計測された結果を掲げた。残留圧力は、60MPa 以下の保持圧力条件では小さく、70MPa 以上で急激に増加している。残留圧力の増加に呼応するかのように、最大離型抵抗が急激に増加して

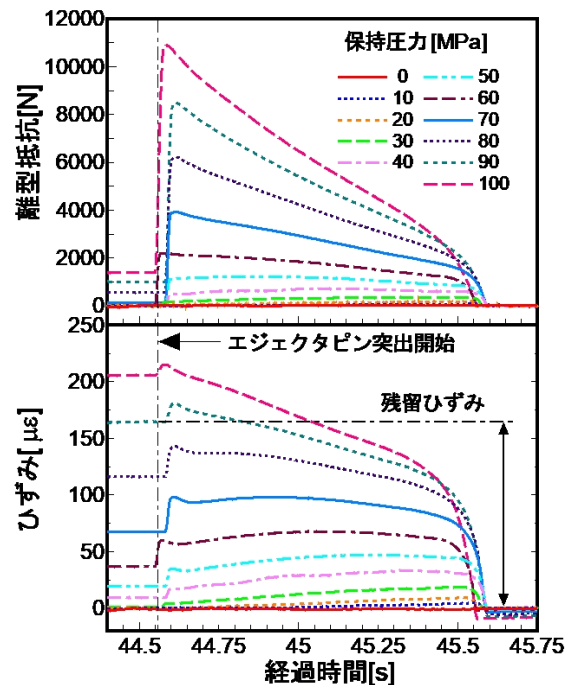


図 13 保持圧力を変化させた場合における離型抵抗とひずみの経時変化

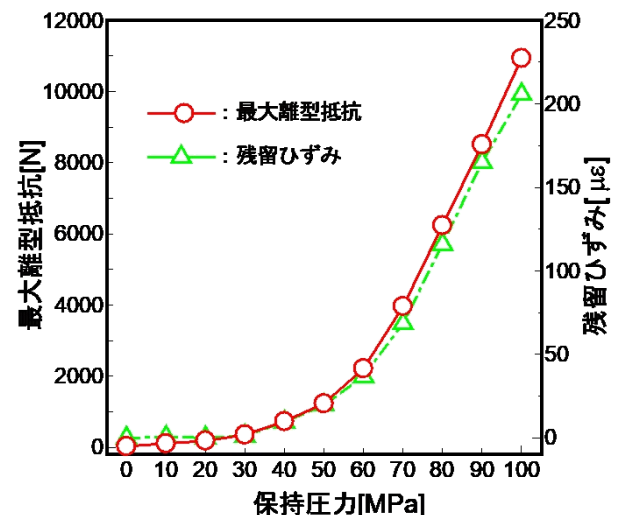


図 14 最大離型抵抗および残留ひずみと保持圧力の関係

おり、両者には、相関関係が見られる。

図14と図15から、残留ひずみと残留圧力の関係を求めて図16に示した。残留ひずみの増加に伴い、残留圧力が放物線状に増加している。図中に示す近似式を用いることにより、樹脂圧力センサを挿入したキャビティ側面ブロックを常時設置しなくても、残留ひずみを計測することで残留圧力を知ることができる。実際に成形品内部に生じている残留圧力は、場所によって値が異なることが報告されているが<sup>5)</sup>、成形品内部で均一と仮定すれば、残留圧力にキャビティの面積を乗じることによって垂直抗力を求めることができる。

#### 4.4 考察

本研究で得られた計測結果を、図17に示す離型抵抗の発生機構の推察図を用いて説明する。キャビティ内に樹脂が射出され(①②)、保圧工程に入ると樹脂圧力が上昇する(③)。その際、キャビティ内では、溶融樹脂がキャビティ面に押

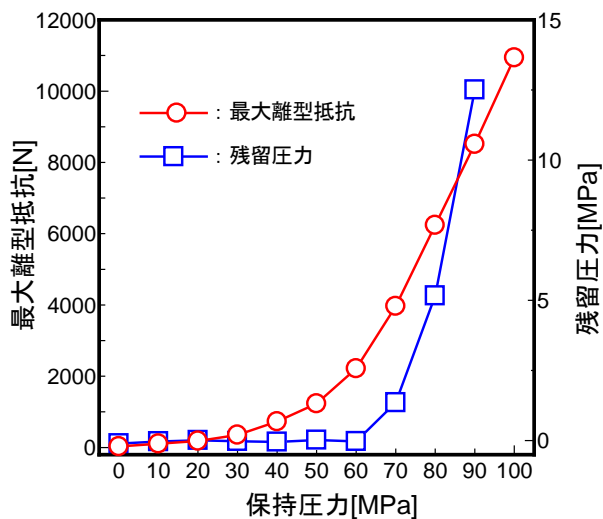


図15 最大離型抵抗および残留圧力と保持圧力の関係

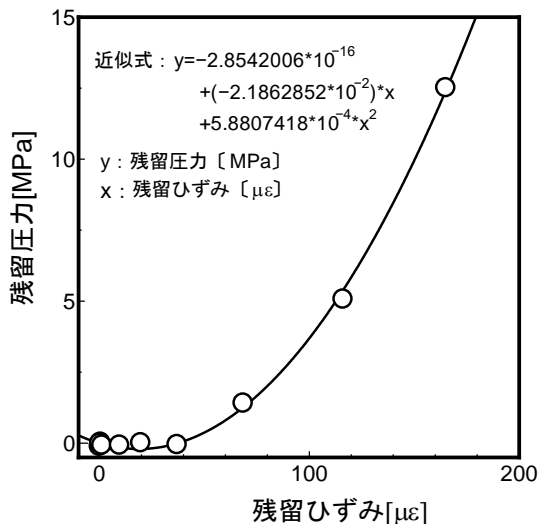


図16 残留圧力と残留ひずみの関係

し付けられ、保持圧力が高いほど、キャビティ表面の微細な凹凸の中に樹脂が浸入し、転写性がより向上する。また、キャビティ表面と樹脂表面との距離が近づくために、メニスカス力が増加する。その後、ゲートがシールし冷却工程に入ると樹脂圧力が低下する。60MPa以下の低い保持圧力条件では、成形品の体積収縮が大きくなるため、型開時に樹脂圧力が0あるいは0に近づく。一方、70MPa以上の高い保持圧力条件では、キャビティ内に樹脂が詰め込まれて成形品の密度が高まり、型開時において成形品内部に圧力が残留する(④⑤)。これが図12において残留圧力が発現した原因と推察される。成形品内部に残留圧力が生じると、キャビティ側面ブロックが押されて変形するため、ブロックには、図12に示すような残留ひずみが生じる。また、樹脂圧力の反力である垂直抗力がキャビティ面から成形品に向けて作用する(⑤)。この力のつりあい状態において、成形品の突き出しが開始されると、離型抵抗が発生する(⑥)。保持圧力が高い場合では、垂直抗力が高くなるために、キャビティ表面の微細な凹凸の中で激しい掘り起こしが発生し、離型抵抗が増加する。また、前述のようにメニスカス力も増加するために、さらに、離型抵抗が増加する。以上より、60MPa以下の保持圧力条件では、離型抵抗の増加が小さく、70MPa以上の保持圧力条件では、離型抵抗が急激に増加したものと推察される。

#### 5. まとめ

成形品が貼り付いている面に沿って発生する離型抵抗を評価するための計測金型の設計・製作を

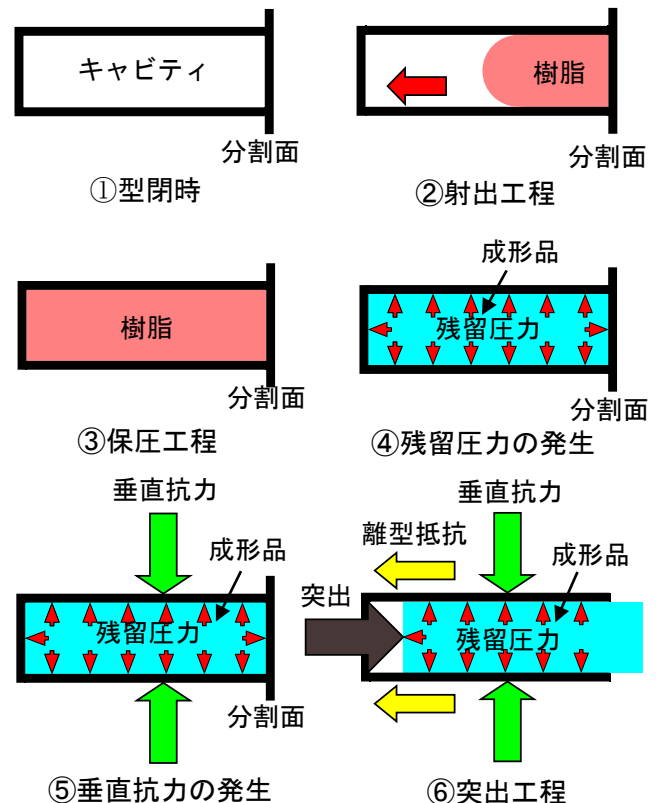


図17 離型抵抗の発生機構の推察図

行った。そして、汎用ポリスチレンを用いた計測実験を通じて、本金型の実用性を確認することができた。現在、プラスチック成形加工分野では、離型性の向上を目指して、金型キャビティ面の性状や離型膜、内部あるいは外部充填形の離型剤の検討が行われている。今後、本金型を、上記課題に適用し、得られた計測結果に基づき、離型抵抗について総合的な考察を行う予定である。

#### 6. 参考文献等

- 1)小林義和, 白井健二, 佐々木哲夫:射出成形におけるコア表面粗さと離型抵抗力の関係, 精密工学会誌, Vol.67, No.3, pp.510-514 (2001)
- 2)太田和良, 岡部眞幸, 中村恭平, 夏恒:カップ形状成形品の射出成形における離型工程での負

圧の影響と通気性金型による離型力低減効果の検証, 精密工学会誌, Vol.87, No.2, pp.231-237 (2021)

- 3)横井秀俊, 市東徹也:微細転写成形における離型抵抗の計測 I, 成形加工'07, pp.141-142 (2007)
- 4)Y.Murata, T.Nakanishi, N.Hirai, F.Kawanishi, H.Ibuki: Development of Mold for Demolding Resistance Measurement in Polymer Injection Molding, Sensors and Materials, Vol.31, No.10 pp.3099-3110 (2019)
- 5)村田泰彦, 忽滑谷晃博, 松井 寛, 吉永和浩, 横井秀俊:射出成形における金型キャビティ面樹脂圧力分布計測, 成形加工, Vol.19, No.9, pp.557-564 (2007)

#### 発表論文(口頭発表)

- (1)染谷玲央, 坂口幸太郎, 村田泰彦, 中島享瑛:プラスチック射出成形品の離型抵抗評価金型, 型技術者会議 2022 (発表予定)