射出成形におけるバリ発生と 金型変形との相関解析（第2報） —成形条件の影響—

村田 泰彦^{*1}・菱田 智大^{*1}・小松 拓哉^{*1}
新田 和男^{*2}・齊藤 一男^{*2}・菊森 一洋^{*2}

Experimental Analysis on Relationship between Flash Generation and Mold Deformation in Injection Mold (Part II) — Influence of Molding Conditions —

Murata, Yasuhiko^{*1}/Hishida, Tomohiro^{*1}/Komatsu, Takuya^{*1}
Nitta, Kazuo^{*2}/Saitoh, Kazuo^{*2}/Kikumori, Kazuhiro^{*2}

In this study, the generation of flash and the mold deformation were investigated when molding conditions were varied in a slide core type mold for molding cylindrical products. When a gap was formed at the divided face between slide cores, how it would influence on generation of flash and mold strain was also investigated. Based on the results, the following results were obtained.

A universal correlation was found between the generation of flash and mold deformation regardless of the injection rate, cylinder temperature, and type of resin used, and even with complicated generation of flash where primary flash and secondary flash occur continuously. In addition, it was confirmed that when gaps are formed at the divided face between slide cores, primary flash occurs due to the flow of melt into the gap even at low holding pressures, and even if primary flash occurs, the outputs of mold strain sensors do not change.

Keywords : Injection molding, Flash, Slide core type mold, Strain sensor

1. 緒 言

近年、プラスチック製品の生産拠点の海外シフトが進んでおり、国内では、海外では開発が困難な高い品質や付加価値を有する製品や、それらを産み出す原動力となる成形加工技術の創出が急務となっている。このような現状から、金型急速加熱・冷却成形法^{1)~4)}や、インモールド転写加飾

成形法⁵⁾、型内組立成形法⁶⁾などの新たな成形加工法が開発され実用化が進んでいる。また、微細発泡射出成形法⁷⁾、ウォータアシスト射出成形法⁸⁾なども実用化が進んでいる。これらの成形加工技術の登場により、ウェルドラインやフローマーク、ひけ、そり変形などの成形不良の抑止が徐々にみられつつある。しかしその一方で、本論文で研究対象としているバリのような生産効率の低下や金型破損の原因となる成形不良が依然として発生し、成形技術者を悩ませている。そのため、これまでの経験と勘による製品・金型設計手法に頼るだけでなく、成形プロセスを、計測技術を用いて深く理解し、得られた実証的根拠に基づき対策を講じることが益々重要となっている。

著者の一部らは、円筒形状成形品を成形するためのスライドコア構造金型の、スライドコア同士の分割面に発生するバリを研究対象として、ひずみセンサなどの各種センサを金型の各部位に取り付けて、バリ発生と金型変形との相関関係について検討を行った。その結果、本金型構造では、

^{*1} 日本工業大学 機械工学科
Nippon Institute of Technology
埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1 (〒345-8501)
4-1, Gakuendai, Miyashiro-machi, Minamisaitama-gun, Saitama
345-8501, JAPAN
ymurata@nit.ac.jp

^{*2} オリンパス(株) ものづくり革新センター 開発ソリューション
本部 先進試作部 成形技術グループ
Olympus Corporation
八王子市石川町 2951 (〒192-8507)
2951, Ishikawa-cho, Hachioji-city, Tokyo 192-8507
2012.10.3 受理

高い樹脂圧力によってスライドコアが固定側モールドベース方向へと押されてモールドベースが変形する際に、コア同士の分割面に隙間が生じ、バリが発生することを明らかにした。また、金型のひずみが大きく増加し始める保持圧力値付近から、バリの発生が開始することを確認し、これより、バリ発生と金型変形との間には密接な相関関係があることを示した⁹⁾。しかし、上記関係は、一種類のポリプロピレンを用いた狭い成形条件範囲内の実験において確認されたものであり、その普遍性については、まだ明らかになっていない。

そこで本論文では、射出率などの成形条件や樹脂が変化した場合の、上記相関関係の普遍性について検討を行った。また、スライドコア同士の分割面にはじめから隙間が生じている場合に、バリ発生形態と金型変形にどのような影響が及ぶかについても検討を行った。

2. 実験方法

2.1 成形品形状および金型条件

スライドコア構造金型の基本構造と成形品の詳細寸法は既報⁹⁾に詳しいので、ここでは省略する。Fig.1は、本論文で検討の対象としている円筒形状成形品の形状とスライドコアの構造を示している。本成形品は、末端にフランジ部が設けられた厚さ2mmの円筒形状である。本金型では、3つのスライドコアが噛み合うことにより円筒外周が構成される。本成形品では、コア同士の分割面に対応する成形品のAからCのライン上のほぼ全域にバリが発生する。

本実験では、スライドコア同士が噛み合った際に、分割面に隙間が生じない正常な場合と、はじめから微小な隙間が生じる場合において、バリ発生形態と金型ひずみにどのような差異が現れるかについて検討を行った。後者の検討では、Fig.2(1)に示すような先端部にダレ状の変形が生じたスライドコアを故意に利用して、それらを(2)の(b)に示すように噛み合わせることで、分割面に微小な隙間を生成させた。

2.2 成形条件と使用センサ

本実験の成形条件をTable 1に示す。本論文では、成形条件の変化や樹脂の違い（樹脂粘度の違い）、さらに、ス

ライドコア同士の分割面に生じた隙間が、バリ発生形態と金型変形にどのような影響を及ぼすかについて検討することを目的としている。そこで、Table 1の中で、下線を付した条件を基本条件として、射出率および樹脂温度、樹脂を変化させて計測実験を行った。前二者の検討では、高粘度のポリプロピレン PP/MA 03（日本ポリプロ㈱, MFR = 11 g/10 min）を用いた。そして、樹脂の違い、ならびに、コア同士の分割面の隙間の影響の検討には、低粘度の PP/MG 05 ES（同上, MFR = 45 g/10 min）を用いた。各条件において、型締力を一定として保持圧力を 0 MPa から 120 MPa の範囲で、10 MPa ずつ段階的に増加させて成形を行うことでバリを発生させ、その際の成形品のバリ高さや金型ひずみ出力を計測した。実験に用いた射出成形機は、ROBOSHOT α -50 iAp（ファナック㈱, 最大型締力 500 kN）である。金型温度およびひずみ出力が安定するまで、20 ショットの予備成形を行った後、各条件において 4 ショットずつサンプリングを行った。データは、4 ショット目を採用した。

本実験では、金型ひずみの計測に、外付式ひずみセンサ Type 9237 A（日本キスラー㈱）と埋込式ひずみセンサ Type 9243 A（同上）を使用した。両ひずみセンサの計測原理については既報⁹⁾に詳しいので、ここでは省略する。Fig.3は、金型ひずみセンサの設置位置を示している。外付式および埋込式ともに、金型固定側の上面(図中 Ea, Ia) および下面 (同 Eb, Ib) にそれぞれ設置した。なお、外付式センサは、X 方向のひずみを、また、埋込式センサは、Z 方向のひずみを検出できるように設置した。さらに、渦電流式変位センサ VS-005 H-1（新川電機㈱）を Fig.3 に示す金型のパーティング面に設置して、型開量を計測した。

本実験では、バリの発生状況を定量的に評価するために、表面粗さ測定器（SURFTEST SV-400, ミットヨ㈱）、あるいは、3D レーザ顕微鏡 VK-9700（㈱キーエンス）を用いて、Fig.1(1)に示す成形品の A から C のライン上の形状を、ラインに対して垂直な方向に計測した。なお、本論文では、測定箇所を、A から C とともに丸で囲った円筒の中央部に決めて計測を行った。

Fig.1 Shape of molded product and slide core structure

3. 成形条件がバリ発生状況と金型変形に及ぼす影響

3.1 バリ発生状況

成形条件や樹脂を変化させた場合に得られた成形品から、表面粗さ測定器を用いてバリの高さを抽出した結果を Fig.4 に示す。なお、(1)は、PP/MA 03 を用いた基本条件の場合、(2)と(3)は、基本条件から射出率、樹脂温度をそれぞれ変化させた場合、(4)は、基本条件において樹脂を PP/MG 05 ES に変えた場合の結果を示している。まず、保持圧力の増加に伴いバリ高さが増加している。また、バリは、A から C の特定の成形品位置から発生開始しておらず、ランダムに発生している。(2)と(3)の射出率および樹脂温度を変化させた場合では、すべての条件において 80 MPa の保持圧力からバリ発生が開始している。一方、樹脂については、(1)の高粘度の PP/MA 03 では、80 MPa からバリの発生が開始したのに対して、(4)の低粘度の PP/MG 05 ES では、70 MPa から開始している。このように、粘度が低い樹脂ほど、低い保持圧力値においてバリの発生が開始する傾向が見られる。射出率や樹脂温度の上昇は、

樹脂粘度の低下をもたらし、バリ発生に影響を及ぼすものと予測された。しかし、本成形条件範囲内においては、上記因子よりも樹類の違いによる粘度の極端な変化の方が、バリ発生に大きな影響をもたらすことが明らかとなった。

3.2 金型ひずみの計測

PP/MA 03 において射出率を変化させて成形を行い、計測された各種センサ出力から、それぞれの最大値を求めて保持圧力との関係として整理した結果を、Fig.5 に示す。バリの発生が開始する保持圧力値を、図中に一点鎖線で示した。両射出率の場合ともに、ひずみ最大値が大きく増加し始める保持圧力値付近からバリ発生が開始している。また、外付式と埋込式ともに、両射出率の場合のひずみ最大値はほとんど一致しており、射出率変化による影響は見られない。型開量も、射出率変化による影響は見られず、最大 $0.6\ \mu\text{m}$ と極めて小さくなっている。

PP/MA 03 において、射出率を $26.5\ \text{cm}^3/\text{s}$ で一定として樹脂温度を変化させた場合の結果を Fig.6 に示す。これらの場合も、ひずみ最大値が大きく増加し始める保持圧力値付近から、バリ発生が開始している。ここでは、樹脂温

(1)Cross section of slide core tip

(2)Schematic diagram on divided face between slide cores

Fig.2 Method of generating gap on divided face between slide cores

Table 1 Molding conditions

Cylinder temperature (°C)	200-200-200-180-50* 230-230-230-210-50*
Mold temperature (°C)	50
Set-up injection rate (cm ³ /s)	26.5/79.5
Holding pressure (MPa)	0/10/20/30/40/50/60/70/80/90/100/110/120
Pressure holding period (s)	9
Clamp force (kN)	500

*) Nozzle-Metering-Compression-Feed-Hopper

Fig. 3 Strain sensor installation position

Fig. 4 Relationship between flash height and holding pressure under various molding conditions

度の増加に伴い、ひずみ最大値の絶対値が若干大きくなっていることが特徴と言える。

最後に、樹脂を変えた場合の結果を Fig. 7 に示す。低粘度の PP/MG 05 ES では保持圧力 70 MPa において、また、高粘度の PP/MA 03 では 80 MPa においてバリ発生が開始し、両者ともに、ひずみ最大値が大きく増加し始める保持圧力値付近から、バリ発生が開始している。また、PP/MG 05 ES において、ひずみ最大値が若干高くなっている。

以上のように、成形条件が変化しても、バリ発生と金型変形との間には依然として密接な相関関係があることが明らかとなった。

Fig. 5 Influence of injection rate on relationship between maximum value of each sensor output and holding pressure (PP/MA 03, Resin temperature : 230 °C, Mold temperature : 50 °C)

4. スライドコア同士の分割面における隙間有無の影響

4.1 バリ発生状況

スライドコア同士の分割面に隙間がある場合において得られた成形品の表面を、3D レーザ顕微鏡を用いて計測した結果を Fig. 8 に示す。なお、本実験では、隙間の影響が大きく表れると予測される、低粘度の PP/MG 05 ES を使用した。まず、40 MPa の低い保持圧力では、スライドコアが噛み合った際に生じた段差が転写された成形品面上に、微小なバリが発生している。また、微小なバリの両側には、コア先端のダレ形状が忠実に転写された V 字状のくぼみが生成されている。一方、100 MPa の高い保持圧力では、微小なバリと大きなバリが積み重なった二段状のバリが発生している。

各保持圧力条件で得られた成形品の表面形状からバリの高さを読み取って整理した結果を Fig. 9 に示す。まず、隙

間がある場合では、保持圧力 10 MPa から 60 MPa にかけて、すでに 10 μm 程度の微小なバリが発生している。一方、隙間がない場合では、上記保持圧力範囲において微小バリの発生は見られない。そして、隙間の有無に関わらず、70 MPa 以上でバリ高さが大きく増加している。

横井らは、2 プレート金型において、金型パーティング面にはじめから生じている隙間に樹脂が流入して発生するバリを一次バリ、樹脂圧力によりパーティング面に隙間が生じて、その隙間に樹脂が流入して発生するバリを二次バリと定義している^{(10),(11)}。本スライドコア構造金型においても、同様のバリ発生形態が現れているものと考えられる。

Fig. 8 と Fig. 9 の計測結果に基づき、一次バリと二次バリの発生プロセスを推察して Fig. 10 に示した。まず、(1)のスライドコア同士の分割面に隙間がない場合では、保持圧力の増加に伴い、高い樹脂圧力を受けてコアが後退し、分割面に隙間が生じる。そして、ある程度の隙間が開いた後、高い樹脂圧力によって隙間付近における樹脂の固化層

が隙間内へと押し込まれ二次バリが発生するものと推察される。一方、(2)の分割面にはじめから隙間がある場合では、まず、(a)に示すように、キャビティ内充填過程において、熔融樹脂が隙間に流れ込み微小な一次バリが発生する。そして、その後、保持圧力の増加によって分割面が開くと、(b)に示すように、すでに固化した一次バ리를隙間内に押し出すように後方から二次バリが発生し、二段状のバリ発生形態が生成されたものと推察される。

4.2 金型ひずみの計測

Fig. 11 は、スライドコア同士の分割面に隙間がない場合とある場合における金型ひずみの最大値と保持圧力との関係を示している。なお、本実験では、外付式ひずみセンサは、金型上面だけに設置して計測を行った。隙間の有無に関わらず、一次バリが発生する 10 MPa から 60 MPa の低保持圧力領域では、ひずみ最大値の変化がほとんど見られない。一方、二次バリが発生する 70 MPa 以上においてひずみ最大値が大きく増加している。このように、隙間の

Fig. 6 Influence of resin temperature on relationship between maximum value of each sensor output and holding pressure (PP/MA 03, Injection rate : 26.5 cm³/s, Mold temperature : 50°C)

Fig. 7 Influence of resin on relationship between maximum value of each sensor output and holding pressure (Injection rate : 26.5 cm³/s, Resin temperature : 230°C, Mold temperature : 50°C)

(1)Holding pressure:40MPa

(2)Holding pressure:100MPa

Fig. 8 Surface profiles of molded products under various holding pressure conditions (Position : B, PP/MG 05 ES, Injection rate : 26.5 cm³/s, Resin temperature : 200°C, Mold temperature : 50°C)

有無に関わらず、二次バリ発生と金型変形との間には相関関係があることが明らかとなった。一方、一次バリが発生する上記保持圧力領域では、隙間の有無にかかわらず、ひずみがほとんど出力されていない。この結果を利用すると、ひずみが出力されていないにも関わらず成形品に微小なバリが発生する場合には、このバリは、分割面にはじめから生じている隙間が原因となる一次バリであるものと特定する

Fig. 9 Influence of gap on relationship between flash height and holding pressure (PP/MG 05 ES, Injection rate : $26.5 \text{ cm}^3/\text{s}$, Resin temperature : 200°C , Mold temperature : 50°C)

ことができる。

5. 結 言

本論文では、成形条件を変化させた場合のバリ発生状況と金型変形について検討を行った。また、スライドコア同士の分割面にはじめから隙間が生じている場合に、バリ発生形態と金型変形にどのような影響が及ぶかについて検討を行った。得られた結論を以下に列記する。

- (1) 射出率および樹脂温度、樹脂を変化させて計測を行った。その結果、すべての条件において、金型ひずみの最大値が大きく増加し始めた直後からバリ発生が開始する。すなわち、成形条件や樹脂の種類に関わらず、バリ発生と金型変形との間には、密接な相関関係があることを明らかにした。
- (2) スライドコア同士の分割面にはじめから隙間が生じている場合では、低い保持圧力から隙間に樹脂が流れ込むことによって微小な一次バリが発生する。また、その際には、金型ひずみが出力されないことを明らかにした。
- (3) 一次バリと二次バリとが連続して発生するような複雑なバリ発生形態を呈する場合においても、バリ発生と金型変形との間には、密接な相関関係があることを明らかにした。

以上のように、本論文では、広い範囲の成形条件において計測を行い、既報⁹⁾で確認されたバリ発生と金型変形との相関関係が普遍的なものであることを実証することができた。この相関関係については、生産現場において以下の活用方法が考えられる。まず、金型ひずみが出力されないにもかかわらずバリが発生するならば、そのバリは一次バ

Fig. 10 Generation mechanism of primary flash and secondary flash

Fig.11 Influence of gap on relationship between maximum value of each sensor output and holding pressure (PP/MG 05 ES, Injection rate : 26.5 cm³/s, Resin temperature : 200°C, Mold temperature : 50°C)

りと特定でき、スライドコアの変形や金型寸法精度などに原因がある。一方、ひずみ出力された際にバリが発生するならば、そのバリは金型変形に起因する二次バリと特定できるなど、ひずみセンサを金型に取り付けることで、バリ発生の原因分析が行えるものと考えられる。また、成形工程において、ひずみ出力が突発的に高くなった場合には、

二次バリが発生している、あるいは、発生している可能性があるものと見なして、その成形品を生産ラインの中でピックアップして排除するなどのような、不良品の分別に利用できるものと考えられる。

おわりに、計測にご協力いただいた日本キスラー㈱、金型温調機を貸与下さった㈱松井製作所に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 宇野泰光：プラスチック・エージエンサイクロペディア 進歩編 2006, 223 (2005)
- 2) 和田明紘, 川端繁忠：成形加工, **3**(2), 165 (1991)
- 3) Renou, N. and Feigenblum, J.：成形加工, **23**(12), 705 (2011)
- 4) 中島 健：プラスチック成形加工学会第 6 回成形金型技術専門委員会資料 (2011)
- 5) 藤井憲太郎：成形加工'11, 77 (2011)
- 6) 例えば, 上村孝志・西田正三・秦康夫：成形加工, **10**, (10), 756 (1998)
- 7) 津田文朗：成形加工, **13**(2), 83 (2001)
- 8) Knights, M.：Plast. Technol., April, 42 (2002)
- 9) 村田泰彦, 橋本浩幸, 原康博, 清水隆弘, 柴崎良介, 新田和男, 菊森一洋：成形加工, **25**(2), 234 (2013)
- 10) 横井秀俊, 横溝穂高：成形加工'97, 54 (1997)
- 11) 横溝穂高, 横井秀俊：成形加工シンポジア'97, 267 (1997)