射出成形におけるバリ発生と 金型変形との相関解析（第1報） —金型変形計測へのひずみセンサの適用—

村田 泰彦^{*1}・橋本 浩幸^{*1}・原 康博^{*1}・清水 隆弘^{*1}
柴崎 良介^{*1}・新田 和男^{*2}・菊森 一洋^{*2}

Experimental Analysis on Relationship between Flash Generation and Mold Deformation in Injection Mold (Part I) —Application of Strain Sensor to Mold Deformation Measurement—

Murata, Yasuhiko^{*1}/Hashimoto, Hiroyuki^{*2}/Hara, Yasuhiro^{*1}/Shimizu, Takahiro^{*1}
Shibasaki, Ryousuke^{*1}/Nitta, Kazuo^{*1}/Kikumori, Kazuhiro^{*1}

Flash, a molding defect in injection molding, is a serious problem as it reduces production efficiency and damages the mold. This study focused on flash generating at the divided face between the slide cores in a slide core type mold for cylindrical molded products. Strain sensors were attached to several parts of the mold, and the Relationship between flash generation and mold deformation was investigated, and the following results were obtained.

First, the deformation of the slide core type mold was clarified during the injection molding process. With this mold structure, the slide cores are pushed by high melt pressure towards the mold base at the stationary mold side. This causes the mold base to deform, resulting in the formation of a gap at the divided face between the slide cores, and the generation of flash. It was also confirmed that flash starts to generate under the holding pressure condition at which strain of the mold starts to increase considerably.

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

1. 緒 言

射出成形は、家電製品や自動車部品、日用雑貨品から、電子・医療デバイスなどの精密部品に至るまでの大量生産

技術として、広く用いられている。しかし、成形現場では、ウェルドラインやフローマーク、シルバーストリーク、バリ、ひけ、そり変形などの成形品の品質を低下させる成形不良が頻繁に発生し、成形技術者を悩ませ続けている。本論文で取り組んでいるバリは、一旦発生すると、除去するための後加工が必要となるために、生産効率の低下を招き、無駄な生産コストを生む。また、金型破損の原因となるために深刻な問題となっている^{1),2)}。バリは、(1)金型の加工精度が低いこと、(2)成形工程中に金型が高い樹脂圧力を受けて変形すること、(3)射出成形機の型締力よりもキャビティ内の樹脂圧力が上まわり金型が開くことなどの要因によって金型のパーティング面に生じた狭い隙間に、樹脂が入り込むことによって発生するものと考えられている^{3),4)}。生産現場では、成形条件の調整や金型構造の検討

^{*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

などの試行錯誤による抑止対策が行われているのが実状である。このような現状から、計算によりバリ発生量の予測を試みたり⁵⁾、CAEを用いて金型変形を計算することにより、バリ発生箇所を予測し、金型設計の指針を得ようとする試みなどが行われている^{6),7)}。しかし、金型変形と実際のバリ発生状況との関係が実証的に明らかにされていない。

著者らは、バリの発生をインプロセスで簡易的かつ高精度に検知する方法の確立を最終的な目的として、金型の各部位にひずみセンサを設置して、バリ発生状況と金型変形(ひずみ)の計測を行った⁸⁾。ここでは、矩形平板キャビティを有した2プレート金型でのパーティング面に発生するバリを対象としていた。

本論文では、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縦バリ(以後、バリと略記する)に上記手法を応用展開し、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。

2. 実験方法

2.1 成形品形状および金型構造

バリの計測対象とした円筒成形品の形状と寸法をFig.1に示す。ゲートは、4点のサイドゲートとした。エジェクタピンによって離型しやすくするために、抜き勾配と円筒の末端部にフランジ部が設けられている。本論文で設計・

製作したバリ発生計測用のスライドコア構造金型の基本構造をFig.2に示す。本金型は、アンギュラピンを用いた3分割のスライドコア構造により、円筒形状成形品が離型できる構造となっている。Fig.1の成形品上のAからCの3つのラインが、スライドコア同士の分割面に対応し、これらのライン上のほぼ全域にバリが発生する。

2.2 使用センサ

成形中に高い樹脂圧力によってスライドコアが押されてスライド方向に沿って後退すると、Fig.3に示す、(1)金型が外周方向へ膨らむように変形する、(2)金型が型開き方向にたわむ、(3)成形機のダイプレートが後退して金型が平行に開くの、3通りの変化が起こる可能性が考えられる。そこで、本論文では、上記3通りの変化を、外付式ひずみセンサ Type 9232 A (日本キスラー株)と埋込式ひずみセンサ Type 9243 A (同)の2種類の水圧電式ひずみセンサ⁹⁾、そして、渦電流式変位センサ VS-005 H-1 (新川電機株)、間接式水圧電式樹脂圧力センサ Type 9221 (日本キスラー株)を用いて計測し、それぞれの計測値とバリ発生状況との相関関係を検討した。(1)の金型が膨らむように変形することによって生じる金型ひずみを、外付式と埋込式ひずみセンサを用いて、さらに、(2)の金型がたわむことによって生じる金型パーティング面の開量と、(3)のダイプレートの後退による開量とを、渦電流式変位

(1)Shape of molded product

(2)Dimension of molded product

Fig.1 Shape and dimension of molded product (Unit ; mm)

Fig.2 Schematic structure of measurement mold (Unit ; mm)

Fig. 3 Change in mold expected causing by retreat of slide cores

センサを用いてそれぞれ計測した。なお、外付け式と埋込式とを併用した理由は、金型変形計測に対する両センサの適正を評価するためである。

外付け式と埋込式ひずみセンサが金型固定側上面に取り付けられた様子を、Fig. 4 に示す。外付け式ひずみセンサは、ネジを用いてプリロードが負荷された状態で金型表面に固定され、樹脂圧力上昇によって取付部の金型部材が変形を起こす際の微小なひずみを捉えるものである。本センサが部材とともに伸び変形を起こす際には正、圧縮変形を起こす際には負のひずみがそれぞれ出力される。一方、埋込式ひずみセンサは、金型に設けられたネジ穴に、プリロードが負荷された状態で埋め込まれ、部材が変形を起こす際の微小ひずみを捉えるものである。

Fig. 5 は、各種センサの設置位置を示している。本論文では、外付け式ひずみセンサを、金型固定側の上下面（図中 Ea, Eb）と側面上（同 Ec），側面中（同 Ed），側面下（同 Ee），そして、可動側の上下面（同 Ef, Eg），側面上（同

Eh），受板裏面（同 Ei），取付板面（同 Ej）の 10 箇所に設置した。なお，Ea, Eb, Ef, Eg, Ei では X 方向のひずみを，Ec, Ed, Ee, Eh, Ej では Z 方向のひずみを検出できるようにセンサを設置した。また，埋込式ひずみセ

Fig. 4 Appearance of various strain sensors

Fig. 5 Insertion position of various sensors

Table 1 Molding conditions

Cylinder temperature (°C)	230-230-230-210-50*
Mold temperature (°C)	42.7/46.7 (Stationary mold side/Movable mold side)
Set-up injection rate (cm ³ /s)	26.5
Holding pressure (MPa)	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

ンサは、金型固定側の上下面（同 Ia, Ib）と可動側の上下面（同 Ic, Id）の 4 箇所それぞれ設置して、Z 方向のひずみを検出した。さらに、渦電流式変位センサは、金型パーティング面付近に設置した。間接式水晶圧電式樹脂圧力センサは、エジェクタピンの下に設置した。なお、本実験では、ひずみセンサの個数の制約から、金型固定側と可動側を同時ではなく別々に分けて計測した。

2.3 成形条件

本実験の成形条件を Table 1 に示す。樹脂は、ポリプロピレン PP/MA 03（日本ポリプロ(株)，MFR=11 g/10 min）を用いた。本実験では、保持圧力を 20 MPa から 120 MPa の範囲で 10 MPa ずつ段階的に変化させて成形を行い、その際の各種センサの出力を記録した。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。実験に使用した射出成形機は ROBOSHOT α-50 iAp（ファナック(株)，最大型締力 500 kN）である。

バリの発生状況を定量的に評価するために、Fig.1 に示す成形品の A から C のライン上の丸で囲った中央部を、ラインに対して垂直な方向に沿って、表面粗さ測定器（SURFTEST SV-400，ミットヨ(株)）を用いて測定した。

3. バリ発生状況と金型ひずみの計測

3.1 バリ発生状況

Fig. 6 は、表面粗さ測定器を用いて測定された Fig.1 のライン B 上の中心部における成形品表面形状の一例を示している。(1)の保持圧力 70 MPa では、型締時に生じたスライドコア合わせ面のわずかなずれが成形品面に転写された、20 μm 程度の段差が見られるものの、バリの発生は見られない。一方、(2)の 80 MPa では、段差部上の赤丸で囲まれた部分に、高さ 5 μm 程度の小さな突起が見られ、段差部に重畳するようにバリが発生している。そして、(3)の 90 MPa では、バリがさらに成長している。

各保持圧力条件において得られた成形品からバリ高さを読み取って整理した結果を、Fig.7 に示す。この場合、B の位置からバリの発生が開始し、一旦バリが発生すると、保持圧力の増加に伴いバリ高さが大きく増加している。

3.2 各種センサ出力の経時変化

Fig. 8 は、保持圧力を変化させて得られた、射出率および射出圧力、キャビティ内樹脂圧力、金型ひずみ、型開量の経時変化を示している。本実験では、成形機の射出率および射出圧力信号も同時にモニターした。型締め時には、型締力によって金型が変形し、その結果、樹脂射出前から

Fig.6 Surface profiles of molded products(Position : B)

Fig.7 Relationship between flash height and holding pressure

Fig. 8 Each sensor output variation curves (Stationary mold side)

ひずみ出力される。本実験では、型締め直後にひずみ出力をゼロにリセットして、型締め後の成形工程において樹脂圧力によって生じるひずみのみを計測することにした。外付式ひずみセンサを金型固定側上面 (Ea) に設置した場合には、正のひずみ出力され、固定側下面 (Eb) では、逆に負のひずみ出力されている。一方、埋込式ひずみセンサでは、上下面 (Ia, Ib) とともに正のひずみ出力されている。このように、特に、外付式ひずみセンサの出力方向から、金型の変形状況が推察できる。保持圧力 40 MPa では、外付式も埋込式ひずみセンサも出力が小さい。一方、バリが発生する保持圧力 120 MPa では、外付式も埋込式も出力が大きく増加している。

3.3 各種センサ出力最大値とバリ発生との関係

Fig. 7 と Fig. 8 より、バリ高さとひずみ出力などとの間には相関関係があるものと予測された。そこで、各種センサ出力から、それぞれの最大値を抽出して、保持圧力との関係として整理し Fig. 9 に示した。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。キャビティ内樹脂圧力の最大値は、保持圧力に正比例して増加し、バリ発生が開始する 80 MPa 付近の保持圧力では変化が見られない。ひずみセンサ出力では、外付式も埋込式も、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。また、金型下側 (Eb, Ib) よりも上側 (Ea, Ia) に設置した方が、ひずみの絶対値が大きくなっている。このように、金型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から、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が示唆された。

最後に、型開量は、バリ発生開始時において $0.3 \mu\text{m}$ 程

Fig. 9 Relationship between maximum value of each sensor output and holding pressure (Stationary mold side)

度と極めて小さくなっている。型開量がほとんど変化しないこの結果から、本金型では、Fig. 3 (2) の金型が型締め方向にたわむことと、(3) の成形機ダイプレートの後退による型開きは、バリ発生原因とはならないものと推察される。

(1) Stationary mold side

(2) Movable mold side

Fig.10 Relationship between maximum value of each sensor output measured in various mold positions and holding pressure

4. 金型各部における金型ひずみの計測

金型各部にひずみセンサを設置して、保持圧力を変化させながら計測を行って得られた出力から、それぞれの最大値を抽出して、保持圧力との関係として整理した結果を Fig.10 に示す。ひずみセンサを金型固定側に設置した (1) では、外付式も埋込式も両方とも、金型下側 (Eb, Ib) よりも上側 (Ea, Ia) に設置した方が、ひずみ最大値の絶対値が大きくなっている。外付式では、金型上側 (Ea) において正、下側 (Eb) において負のひずみが出力されている。側面に設置した場合は、側面上 (Ec) が負、側面下 (Ee) が正のひずみが出力されており、ひずみ最大値の絶対値は、側面上 (Ec) よりも側面下 (Ee) の方が大きくなっている。また、側面中 (Ed) では、ひずみは出力されていない。一方、ひずみセンサを可動側に設置した (2) では、固定側に比べてひずみの絶対値が小さくなっていることが大きな特徴と言える。また、受板裏面 (Ei) と取付板面 (Ej) にそれぞれ設置した場合も、ひずみ最大値の絶対値が極めて小さい。さらに、埋込式 (Ic, Id) ではひずみは出力されない。このように、スライドコア構造金型では、成形工程においてコアが高い樹脂圧力を受けた際に、金型固定側が大きく変形し、一方、可動側は、ほとんど変形しないことが示された。

Fig.10 より、外付式も埋込式も、ひずみが出力されない金型部位を除いて、バリが発生する 80 MPa 以上の保持圧力においてひずみ最大値が大きく増加しはじめている。このように、金型の部位に関わらず、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が確認される。

E: External type strain sensor

I: Insertion type strain sensor

Fig.11 Mold deformation behavior (Stationary mold side)

5. 金型変形状況とバリ発生原因

計測された金型各部におけるひずみ出力から、固定側モールドベースの変形状況を推察して Fig.11 に示した。なお、同図は、Fig.2 の F-F 断面を示している。外付け式ひずみセンサを固定側上 (Ea) と側面下 (Ee) に設置した場合において、大きな正のひずみ最大値が得られた。これは、センサがスライドコアの後方のモールドベースに設置されているため、高い樹脂圧力によってコアが開く際に、コアからの力を直接受けてモールドベースが外側方向に凸形に大きく変形し、その結果、センサが設置された金

型表面が伸び変形を起こしたためと推察される。また、金型下面 (Eb) および側面上 (Ec) に外付け式ひずみセンサを設置した場合では、小さな負のひずみ最大値が出力された。これは、コアからの力を直接受けて、コア後方のモールドベースが凸形に変形する際に、この変形領域に挟まれたモールドベース領域は、逆に凹形に変形し、その結果、センサが設置された金型表面が圧縮変形を起こしたためと推察される。

以上のように、成形過程の高い樹脂圧力によってスライドコアが開く際の、固定側モールドベースの変形状況が明らかとなった。これらの結果より、本金型におけるバリは、樹脂圧力の増加によってコアが外周のモールドベース方向へと押され、Fig. 3(1)に示すようにモールドベースが膨らむように変形し、その際に、コア同士の分割面に隙間が生じ、隙間に樹脂が流れ込んで発生するものと考えられる。

6. 結 言

本論文では、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対象として、バリ発生状況と金型ひずみの計測を行った。得られた結果を以下に列記する。

- (1) 本金型では、成形工程において高い樹脂圧力を受けた際に、金型固定側が大きく変形し、一方、可動側はほとんど変形しないことを明らかにした。
- (2) 成形過程の高い樹脂圧力によってスライドコアが開く際に、コアからの力を直接受ける固定側モールドベース部分は、外側方向へ凸形に変形し、一方、それ以外の部分は、内側方向に凹形に変形する、あるいは、ほとんど変形しないなどの本金型の変形状況を明らかにした。
- (3) 本金型では、金型の型開き方向へのたわみと、成形機ダイプレートの後退による型開きはバリの発生原因とはならない。本金型におけるバリは、上記(2)項で述べたように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、隙間に樹脂が流れ込んで発生

することを明らかにした。

- (4) 金型各部においてひずみを計測した結果、金型ひずみ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、バリ発生と金型変形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、スライドコア構造金型における金型変形状況とバリ発生原因を明らかにすることができた。また、バリの発生原因となる、本金型の変形しやすい部位を把握することができた。これらの知見は、例えば、モールドベース側面を補強するなどの、バリが発生しない金型構造の設計に対する有効な指針を与えるものと考えられる。さらに、バリ発生と金型変形の間には密接な相関関係があることが示唆された。今後は、射出率などの成形条件や樹脂が変化した場合の、上記関係の普遍性について検討を行うことが課題と考えられる。

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

参 考 文 献

- 1) 射出成形事典：378(2002) 産業調査会
- 2) 廣恵章利，本吉正信：プラスチック成形加工入門，242 (1979) 日刊工業新聞社
- 3) 横井秀俊，横溝穂高：成形加工'97，54(1997)
- 4) 横溝穂高，横井秀俊：成形加工シンポジア'97，267 (1997)
- 5) 樋口弘幸，後藤浩文：成形加工シンポジア'01，57 (2001)
- 6) 是澤宏之，竹中龍夫：日本機械学会論文集(C編)，63 (610)，324(1997)
- 7) 清水康弘，鈴木 裕：2007 年度精密工学会春季大会 学術講演論文集，653(2007)
- 8) 村田泰彦，日下田匡行，折田浩春：成形加工シンポジア'05，185(2005)
- 9) Gautschi, G: Piezoelectric sensors, Springer, 127 (2001)