射出成形金型の構造的剛性と成形不良* (射出成形金型の金型構造の改善によるバリ生成の低減)

是 澤 宏 之^{*1}, 鈴 木 裕^{*2}
竹 中 龍 夫^{*3}, 金 城 盛 順^{*3}

Structural Stiffness of Injection Mold and Molding Defect (Discussion on Reducing Molding Flash by Improving Structure of Injection Mold)

Hiroshi KORESAWA, Hiroshi SUZUKI,
Tatsuo TAKENAKA and Seijun KINJO

Conventional mold design generally depends on the experience of the designer, however design principles have not been substantiated technically. Therefore, in the mold-size determining stage which is the first step in the design, the mold-size tends to be increased with the intent of achieving sufficient structural stiffness. However, increasing in the mold-size unnecessarily brings about increasing in cost, and requires a larger injection machine. In order to solve these problems and to develop a new mold structure, structural analysis of mold using nonlinear FEM analysis has been carried out in this study. Several kinds of mold structures which consist of those designed by conventional method, newly designed in parting surface, and increased in size, have been analyzed and compared as regards deformation of the parting surface, because an excessive deformation in the molding process will cause a molding flash at the edge of parting surface. The following are the results of structural analysis. (1) An inclined parting surface is the most effective to reduce a deformation at the edge of parting surface. (2) Mold structure in which the moving mold half is thickened in the clamping direction is also effective, but the mold clamping stroke will be limited.

Key Words: Mold, Mold Deformation, Mold Size, Molding Defect, Molding Flash, Parting Surface, Injection Molding, Structural Stiffness

1. 緒 言

射出成形用の金型は、成形品を成形する過程でさまざまな外力を成形機や成形樹脂などから受けることにより変形する。金型の構造的な剛性(以下、金型剛性と呼ぶ)の不足に起因する過度な変形は、成形品にバリや偏肉あるいは離型不良などの成形不良を発生させる一因となる。一般的に、金型剛性は金型の大きさ(以下、金型サイズと呼ぶ)に依存すると考えられている。このため、金型剛性は金型サイズをその底面あるいは側面方向に厚くすることにより向上すると考えられている。

金型サイズは、金型設計の初期段階で決定されるため⁽¹⁾⁽²⁾、決定後の金型設計・製造あるいは成形品の成形性に対する影響が高い。したがって、金型サイズの決定は金型設計の中でも極めて重要な工程であるとい

える。しかしながら、実際の金型設計現場において、この決定は技術的裏付けをとられることもなく、従来からの設計ノウハウに依存しており、結果として金型サイズは必要以上に大きくなる傾向にある。これは、金型製造および成形に関するさまざまなコストを高騰させる原因となり⁽²⁾、大形の成形品を成形する大形金型ほど顕著となる。また、金型サイズを大きくすることによる金型剛性の向上と成形不良の低減との関係は必ずしも明確になっていないのが現状である。

そこで、本研究の目的は、射出成形における金型の変形に起因する成形不良の低減を可能とする金型構造を新たに開発することにある。成形不良の一つとして金型分割面先端で発生するバリに注目し、これを低減する金型構造とその金型設計に関する指針を得たので報告する。

2. 成形不良と対策

2・1 金型に作用する外力とバリ生成 金型は、図1(a)に示すように、型締工程から取出工程までの一連の工程を繰返すことにより成形品を得る。各工程

* 原稿受付 1996年3月25日。

*¹ 正員、九州工業大学大学院 (〒820 飯塚市川津680-4)。

*² 正員、九州工業大学情報工学部。

*³ (株)メルコ (〒438 01 静岡県磐田郡豊岡村合代島1207)。

において、金型は、図1(b)に示すさまざまな外力を受ける。金型は弾性体であるため、外力の作用により変形する。これが過度に生じた場合、さまざまな成形不良が発生する。例えば、不均一な樹脂の流れによるコアの倒れは成形品に偏肉を発生し、固定型と可動型の不適切な金型温度による熱変形は型開きを困難とする場合がある。

本研究で対象とする成形不良は、金型分割面先端で発生するバリである。これに最も影響を与える外力は、金型が型締工程から型開工程の間に成形機から受ける型締力と射出工程の開始から冷却工程の終了までに受ける樹脂圧力である。樹脂圧力は金型を開こうとする方向に作用することから、型締力はこれに抵抗して、金型分割面を閉じておくに十分なものでなければならない。同時に、これらの外力に対して、金型は十分な金型剛性も必要とする。

2・2 バリ低減の改善策 バリ生成を低減する解決方法として、以下のような改善策が考えられる。

1. 樹脂圧力を低くする。
2. 金型サイズを大きくする。
3. 型締力を大きくする。

Fig. 1 Molding process and external forces applied to mold surfaces

1 は、樹脂圧力の低下に伴う型締力の低減による、相対的な金型剛性の向上を意味する。例えば、ガスアシスト成形法⁽³⁾や射出圧縮成形法⁽⁴⁾あるいは射出圧力を成形中の負荷に応じて成形機が適応的に制御する成形法などの低圧成形方法の適用や流動性のよい樹脂の使用などが考えられる。しかしながら、前者は一般的な射出成形法と比べて、成形機以外の設備の必要性や成形シーケンスの複雑性や成形サイクルが長くなるなどの問題点を有する。後者は流動性がよいことからバリの発生する可能性が高くなる問題点を有する。

2 は、簡便に金型剛性を向上することができると一般的に考えられている方法である。しかしながら、必要以上の金型サイズは、金型製造費および使用成形機の大形化による成形費の高騰などの問題点を有する。

3 は、経験的に知られている方法⁽⁵⁾である。しかしながら、高い型締力を出力する成形機は必然的に大形化するために成形費を高騰させ、高い型締力は金型に高い金型剛性を必要とするなどの問題点を有する。

本研究は、上記の改善策を用いることなくバリ生成の低減を可能とする金型構造を検討するものである。

3. 解析モデル

3・1 成形品および解析モデル 図2に解析に用いた成形品外観を示す。AおよびBは、深い形状と平らな形状からなる成形品を想定した。多くの成形品の形状は、これらの成形品の間に属すると考えられる。両モデルともダイレクトスプルゲート(点A)とする。

想定した成形品に対して、実際の金型技術者による金型設計を行い、これを従来型と定義する。次に、バリの発生を低減すると考えられる金型構造を設計し、これらを改善型として定義する。各構造は、金型分割面先端からX方向に平行な一定区間の金型分割面の構造を同一とし、これを基準金型分割面とする。

図3に成形品AおよびBを成形する従来型および改善型の断面図を示す。A1およびB1は従来型であ

Fig. 2 Moldings

Fig. 3 Analyzed model

り、A2～A6 および B2～B6 は改善型である。

A2～A4 および B2～B4 は、それぞれの従来型と同一の金型サイズで基準金型分割面を除いた金型分割面の構造を変化させた金型構造である。A2, A3 および B2, B3 は、金型分割面をいんろう合せにした構造であり、金型分割面上の X 方向の滑りを低減できると期待される。これらは、現状の金型設計においても使用される構造である。A4 および B4 は、本研究で提案する金型構造である。金型分割面をテーパ構造にすることによって、いんろう合せにした構造の利点と固定型側面の変形を全体的に低減できると期待される。なお、テーパ角度 θ は、 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 90^\circ$ に変化させて解析する。特に、A4 ($\theta=90^\circ$) および B4 ($\theta=60^\circ, 70^\circ, 90^\circ$) では、テーパ構造の金型分割面が金型側面へ直接到達しない。よって図 3 に示すように、基準金型分割面の位置を基準として、Z 方向に一定の高さを越えたテーパ構造の金型分割面は、その点から金型側面に向かって水平な金型分割面(辺 ab)とする。テーパ構造の効果を調べるため、辺 ab の金型分割面は互いに接触せず、型締力を伝えないものとする。これより、例えば A4 ($\theta=90^\circ$) および B4 ($\theta=90^\circ$) は、金型分割面に作用する型締方向の力を基準金型分割面のみで受ける。

A5, A6 および B5, B6 は、各従来型の金型サイズを底面あるいは側面方向に厚くした金型であり、金型剛性を向上させると考えられている一般的な改善構造である。したがって、それぞれの従来型および金型分割面の構造を改善した金型と比較するため、これらの

Fig. 4 Boundary condition (analyzed model A1, B1)

解析も同時に行う。

型締力の作用する面積は、A1～A5 および B1～B5 では同一であり、側面方向へ金型サイズを厚くした A6 および B6 では各従来型よりも大きくなる。

3・2 境界条件 成形品 A および B の従来型(解析モデル A1 および B1)における境界条件を図 4 に示す。成形品が軸対称のモデルであることから解析モデルも Z 軸を中心とした軸対称モデルとし、図 3 に示したその他の解析モデルもこれに従うものとする。

型締力は辺 LK に $P1$ の圧力で作用し、樹脂圧力は、解析モデル A1 に対して辺 ABC および辺 GHI に、解析モデル B1 に対して辺 ABC および辺 GI に対して垂直方向に $P2$ の圧力で作用すると仮定する。固定型と可動型は互いに金型分割面(辺 CD および辺 IJ)で接触し、その境界面では摩擦を伴う滑りが生じるため、解析は境界非線形となる。なお、摩擦はクーロン摩擦とし、本解析は時間の項を考慮しない静的解析とする。また、金型分割面先端(点 C および点 I)から X の正の方向に 20 mm の区間を基準金型分割面とする。成形機は成形中に変形しないと仮定する。

樹脂圧力の値を決定するため、成形品 A に対して樹脂流動解析を行った。使用樹脂は ABS 樹脂 (DAICEL/CEVIAN-V 510) とし、成形条件は、射出時間 2 秒、保圧時間 10 秒および冷却時間 10 秒とした。図 5 に樹脂流動解析の結果から得られた金型キャビティ内の樹脂圧力分布を示す。これより、樹脂圧力

は保圧工程(射出開始から3.5秒)で最大となり、その最大値はゲート下(点A)において約34.3 MPaであった。よって、本解析における最大樹脂圧力を34.3 MPaとする。

金型設計において、成形に必要な型締力は、キャビティ形状を型締方向に投影した面積に一定の最大樹脂圧力を乗じて求められる。本解析でのキャビティ形状の投影面積は7854 mm²であるため、必要な型締力は270 kN以上である。これを作用するダイベースの面積で割ることにより、ダイベースに作用させる必要な型締圧力が求まる。A1のダイベースの面積は18143 mm²であるため、必要な型締圧力は14.8 MPa以上となる。よって、A1の辺LKに作用する最大型締圧力を19.6 MPaとする。これより、型締力は355 kN以上となることから、金型設計において一般的に金型は開かないとされる型締力を設定したことになる。

本解析は、金型構造の変化によるバリ生成の変化を観察するため、全解析モデルの境界条件である最大樹脂圧力および最大型締力を同一とする。A1を除く金型Aと金型Bに作用する最大樹脂圧力は、A1のそ

れと同一の値を用いる。金型AおよびBともキャビティ形状を型締方向に投影した面積は同一より、その最大型締力も同一となる。したがって、A2~A5およびB1~B5の最大型締圧力はA1のそれと同一となり、側面方向に厚くしたA6およびB6は、他の解析モデルよりも広いダイベース面積(39820 mm²)で成形機から型締力を受けるため、その最大型締圧力は約8.93 MPaとなる。

本解析は静的解析であるため、図1(a)に示した成形工程を「型締過程」、「加圧過程」および「減圧過程」の三つの過程とする解析上の簡略化を行う。解析の総ステップ数は15ステップとし、各過程ごとのステップ数は5ステップとする。境界条件である型締圧力および樹脂圧力は、図6に示すように、荷重増分で与える。各ステップにおける各圧力は、それらの作用する面に対して、均一に作用するものとする。実際の成形と比較すると、これは厳しい境界条件である。反面、設計的な側面から捉えた場合、これ以上の金型の変形は発生しないと考えられるものでもある。

4. 解析結果および評価

4.1 金型分割面先端の挙動とバリ生成

図7に成形品Aの従来型(解析モデルA1)における固定型および可動型の金型分割面先端(点Cおよび点I)の

Fig. 5 Distribution of resin pressure inside the mold A1 from the flow analysis

Fig. 6 Boundary condition for clamping and resin pressure for all analyzed models

Fig. 7 Deformation behavior at the edge of the parting surface for analysis steps

挙動を示す。なお、金型分割面先端の X および Z 方向の間げきを dx および dz とする。

型締過程開始(ステップ1)から型締過程終了(ステップ5)までの挙動において、型締圧力の増加に伴い、 Z 方向に大きく変位するが、間げきの発生は認められない。型締過程終了から加圧過程終了(ステップ10)までの挙動において、キャビティ内での樹脂圧力の増加に伴い、 X 方向および Z 方向変位とも変化する。最大樹脂圧力が作用する加圧終了時において、間げき dx および dz は最大となる。加圧過程終了から減圧過程終了(ステップ15)までの挙動において、樹脂圧力の減少に伴って、その間げきも徐々に減少する。

型締過程終了と減圧過程終了の境界条件は図6より同一であるが、特に間げき dx の量は異なる。これは、金型分割面に摩擦を考慮したためである。型締過程終了における状態を基準にしたとき、 X 方向および Z 方向の間げきに大きな影響を与える変形は、それぞれ固定型および可動型の変形であることを確認した。上述した変形挙動は、全解析モデルで同様な傾向を示した。

これより、樹脂圧力が作用することによって、金型分割面先端の間げきが生じることを確認した。その大きさはバリ生成を代表すると考える。従来型の間げきを基準として、各改善型のそれを比較することにより、金型構造とバリ生成との関係を定性的に評価する。

4・2 従来型と改善型

4・1 節の結果から、従来型に対する改善型の改善効果は、加圧過程終了における X および Z 方向の金型分割面先端の間げきを用いて改善度の評価を式1で示す。

Degree of improvement in X -

$$\text{or } Z\text{-direction gap} = \frac{c-i}{c} \dots\dots\dots (1)$$

where

c : X - or Z -direction gap for conventional model

i : X - or Z -direction gap for improved model

ただし、 c および i は、それぞれ従来型および改善型における X あるいは Z 方向の金型分割面先端の間げきを示す。これより、最も改善される場合は $i=0$ のときであり、改善度は1となる。また、従来型と同一の間げきを示す場合は $i=c$ となり、改善度は零となる。

図8に、金型分割面先端の間げきに関する従来型を基準とした各改善型の改善度を示す。各従来型と同一金型サイズの改善型に関して、 X および Z 方向に関して最も改善された解析モデルは、本研究で提案する

金型分割面をテーパ構造にした $A4$ および $B4$ であった。 $A4, B4$ の傾向として、テーパ角度 θ の増加に伴い、その改善度も増加する。このとき、 Z 方向の改善度は $\theta=90^\circ$ で最大となり、 X 方向の改善度は $\theta=60^\circ \sim 70^\circ$ 付近で最大となる。いんろう合せの構造である $A2, B2$ および $A3, B3$ に関して、 $A2, B2$ は X 方向に高い改善度を得るが、 Z 方向の改善度は各従来型と同程度である。 $A3, B3$ の改善度は $A2, B2$ のそれより低く、各従来型よりも低い場合もある。金型分割面の構造を改善した改善型は、金型分割面が水平な従来

Fig.8 Degree of improvement observed X - and Z -direction gaps at the edge of the parting surface for the improved models in comparison with the conventional model

(a) Mold type A

(b) Mold type B

A1, B1: conventional model A2~A6, B2~B6: improved model
 ■ Thickness added to the conventional model

Fig. 9 Normal and shear stresses applied to the reference parting surface

型よりも改善されるが、 X 方向の改善度に上限が存在する。また、A2, A4 および B2, B4 の構造は、固定型における金型分割面先端の X 方向の変形を低減すると考えられる。

各従来型の金型サイズよりも厚くする改善型に関して、金型サイズを底面方向に厚くする A5 および B5 は、各解析モデルの中で最も Z 方向に改善される。B5 は、 X 方向においても最大の改善度を示す。金型サイズを側面方向に厚くする A6 および B6 は、各従来型よりも改善度が低く、バリ生成の低減には効果が低いことが認められる。

成形機によりダイベースに作用した型締力は、金型分割面上では圧縮力として作用する。一般的にこの圧

縮力は、成形中に金型を開く方向に作用する樹脂圧力の増加に伴って減少する。金型分割面上で圧縮力が作用する部分では、圧縮力の作用する方向での間げきは発生しない。全解析モデルにおいて基準金型分割面の形状は同一であることから、これに作用する外力と金型分割面先端の型締方向の間げきとの関係を評価する。図 9 に、型締過程終了および加圧過程終了における圧縮応力およびせん断応力を示す。これらは、基準金型分割面に作用する圧縮力とせん断力をその面積で除した応力値である。型締方向の間げきは、図 8 に示す Z 方向の改善度を用いる。これより、型締方向の間げきは加圧過程終了での圧縮応力の値が高いほど改善される傾向にある。同様にこれは、型締過程終了での圧縮応力の値に対しても高い相関を示す。なお、加圧過程終了での圧縮応力の値が零となるとき、基準金型分割面は完全に接触しない状態である。

金型サイズを従来型と同一とした本研究で提案する A4 および B4 では、テーパ角度 θ の増加に伴いテーパ構造部分での型締方向の力は減少する。ダイベースに作用する型締力は全解析モデルにおいて同一であるから、基準金型分割面に作用する圧縮応力が実質的に増加したと考えられる。また図 8 より、 Z 方向に最も改善された A4($\theta=90^\circ$) および B4($\theta=90^\circ$) は、他のモデルと比較して、型締過程終了および加圧過程終了ともに高い圧縮応力を確認できる。これは、ダイベースに作用した型締力を、その他の解析モデルと比較して、最も小さな金型分割面となる基準金型分割面で受けたからである。

一方、金型サイズを底面方向に厚くした A5, B5 に作用する圧縮応力は A4($\theta=90^\circ$) および B4($\theta=90^\circ$) よりも低い。図 8 より Z 方向に最大の改善を得る。金型の底面が厚くなることによる断面二次モーメントの増加が、可動型における金型分割面先端の Z 方向の変形を低減すると考えられる。

各解析モデルに作用するせん断応力は圧縮応力よりも低いことから、金型分割面先端の間げきへの影響は低いと考えられる。

5. 結 言

本研究では、外力の作用による金型の変形に起因する成形不良の一つである金型分割面先端で発生するバリに注目し、その低減を可能とする金型構造を定性的に検討し、以下に示す結果を得た。

(1) 金型サイズを変更しない場合、金型分割面先端付近の金型分割面により大きな圧縮応力を作用させると効果的である。その金型構造の一例として、金型

分割面をテーパ構造とした金型は、金型分割面先端の X および Z 方向の間げきを低減する。特に、深い形状の成形品を成形する金型の場合、使用する金型素材の大きさおよびその加工量は大きさの等しい従来の金型構造と同程度である利点を有する。

(2) 金型サイズを厚くした場合、可動型の金型サイズを底面方向に厚くする構造が効果的であり、側面方向に厚くする構造は効果的でない。しかしながら、金型サイズを底面方向に厚くした場合、成形機のストローク長さが大きくなる欠点を有する。

(3) 上述した(1)および(2)の傾向は、成形品の形状に大きく依存しない。

最後に、本研究を遂行するにあたり、ご助言をいただいた、日立造船情報システム(株)に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 井上久仁子・関口博・小島俊雄, 機械技術研究所資料, 77, (1985).
- (2) 是澤宏之・鈴木裕・竹中龍夫・金城盛順, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1994), 933-934.
- (3) 例えば, 酒井昭二, プラスチック成形 598 工学会誌, 5-9 (1993), 593-598.
- (4) 例えば, 日経メカニカル, 4-6 (1992), 66-67.
- (5) 森隆, やさしい射出成形の不良対策(1989), 52, 三光出版社.