大曲率半径の面を有するプラスチック成形品のそり数値解析

館 山 弘 文^{*1}・土 屋 淳 志^{*1}・小 山 清 人^{*2}

The Warpage Analysis of Plastic Parts with Large Radii of Curvature

Tateyama, Hirofumi^{*1}/Tsuchiya, Atsushi^{*1}/Koyama, Kiyohito^{*2}

In general, warpage of injection molded parts is greatly affected by part design and molding conditions. Since the mechanisms of warpage are complicated, the ability to predict and avoid warpage is very difficult and has not yet been established. When parts are designed in 3-D, it is especially difficult to predict and take effective counter measures against warpage.

In this study, numerical warpage analysis and molding tests of plastic parts with large radii of curvature were carried out. Warpage for several patterns of molding parameters were compared for analysis and actual molding tests. Our results show that the amount of warpage predicted by the analysis was larger than that in the actual molding for all molding parameters tested. The differences between analytical and actual warpages correlated with initial warpage, which occurred just after the molded part was taken out from the tool.

Key words : Injection molding/Warpage numerical analysis/Shrinkage/Precision of analysis

1. 緒 言

熱可塑性プラスチックの射出成形では、熔融樹脂を低温に保持された金型に充填し、冷却固化を経て成形品が得られる。この冷却固化の過程において、金型内に充填された樹脂は、収縮を伴いながら成形品形状を形作るが、その成形条件、成形品形状等の影響を受け、成形品全体が均一に収縮することはない。結果として、成形品にそり変形等の成形不良が発生する。

近年、数値解析を用いて成形品のそりを事前に予測する手法が提案されている。しかし、成形品そりの発生メカニズムは非常に複雑で、予測精度は未だ十分とは言えない。

一般に、これまでの数値解析によるそり予測は、平板等の単純形状においては、実用性が認められている^{1)~2)}。しかし、リブやボス等がある形状や箱型のような立体的な形状になると、その予測精度は著しく低下する。このため、基礎的な研究も進められている^{3)~7)}。

そこで著者らは、前報⁸⁾において、そり挙動が観察しやすい大きな曲率半径の面を有する成形品を用い、成形品に経時的に発生するそりの詳細観察結果を報告した。すなわち成形品の最終そりは、成形品が金型から取り出された瞬間に発生する初期そり、および金型から取り出されてから収縮が安定するまでに発生するその後のそりが合成されたものであることを示した。また初期そりおよび最終そりの成形条件依存性に関しても報告した。

本報においては、前報と同形状について有限要素法を用いた数値解析により、そりの解析を行い実成形データと詳細比較し考察した。

2. 実 験

本研究では、成形実験とコンピューターを用いた数値解析を実施した。以下に詳細を示した。

2.1 成形品形状と使用樹脂

本研究で用いた成形品形状を図1に示した。本モデルは、家電製品のコントロールパネルあるいはその扉をイメージし、大きな曲率半径 $R_0 = 3260 \text{ mm}$ を持った曲面部と外周に垂直方向のリブが設置された形状である。ゲートは、機能性、外観品質要求の点からサイドゲート1点とし、成形品中央下部に設置した。樹脂は、このような製品でよく用いられる耐衝撃ポリスチレンを使用した。

2.2 実験条件の設定

実験条件の詳細を表1に示した。本実験では、そりに与える成形条件の影響を調査するため、樹脂温度、充填時間、

^{*1} 福島市蓬萊町 1-11-1 (〒960-8506)
ムネカタ㈱R&D センター
Research & Development center, Munekata Co., Ltd.,
1-11-1, Hourai-cho, Fukushima, 960-8506, Japan
^{*2} 山形大学工学部機能高分子工学科
米沢氏城南 4-3-16 (〒992-8510)
Department of Polymer Science and Engineering,
Faculty of Engineering, Yamagata University
4-3-16, Jounan, Yonezawa 992-8510, Japan
2003. 6. 2 受理

Fig.1 Illustration of part model

Table 1 Conditions of experiment for warpage analysis and molding

Molding Machine	Clamping force of machine is 80 tf (794 kN)	
Resin	High Impact Polystyrene ; MS 500 (MFR : 5.0 g / 10 min) , Idemitsu Petrochemical Co., Ltd.	
Material temperature (°C)	205~237	
Filling time (s)	1.3~5.0	
Holding pressure (MPa)	48.9~81.5	
Holding time (s)	5~10	
Cooling time (s)	10~30	
Tool temperature (°C)	Fixed side of the tool	30
	Movable side of the tool	12

保持圧力，保圧時間，冷却時間を変動要因とした。ただし，ヒケ，バリあるいはオーバーパックやバックフロー等の成形不良のない範囲で成形条件を選定し，最終的に表2に示した条件を設定した。

また金型温度は，成形品に複雑な熱挙動を与え，そりを発生させる要因として知られている^{9)~11)}。離型時に成形品の固定側と可動側の温度差が大きいと，他の成形条件の依存性の結果に影響を示す場合がある。そのため本実験では，取り出し時の成形品表面温度およびその後の冷却速度がほ

ぼ均一になるように，固定側および可動側金型の温度と冷却水量を事前に調整し，その金型温度条件を固定した。

2.3 数値解析

数値解析用ソフトに Moldflow Plastics Insight 3.1 (Moldflow 社) を用いた。図1に示したモデル形状で，最初に充填・保圧解析および金型冷却解析を行った。次に，算出された金型のキャビティ面温度分布を境界条件とした充填・保圧解析を行った。さらに圧力，温度等を考慮した成形品の体積収縮率分布を算出した。そり解析では，この体積収縮率分布からの応力を用いて，成形品の変形量を算出した。一般的に，そり解析では経時的なシミュレーションが行えないため，最終的な成形品のそり量のみ算出した。解析条件は，上記に示した実成形条件と全く同じ条件とした。

2.4 そり解析における拘束点の設定

そり量を算出する際に，成形品の一部を固定する拘束点の設定が必要となる。図2に示したように，通常よく用いられる成形品曲面部端面を拘束点に設定する方法 (Case 1) と，後述のそりの定義から結果を比較しやすい成形品曲面部中央を拘束点に設定する方法 (Case 2) の二つを事前に検討した。その結果，どちらの設定方法でも，成形品の最終そり量は全く同じであった。よって本実験においては，Case 2 の設定方法を採用した。

2.5 成形品のそり評価方法とそり変化量の定義

図3に示したように，金型の実測値である曲率半径 $R_0 = 3260$ mm での Z 軸方向の変位を基準とし，0 mm とした。金型から成形品を取り出した直後からそりが安定するまで継続的にその変位を計測した。前報で報告したとおり，本実験で用いた大曲率半径の面を有する成形品では，金型から取り出してから，経時的に二つの異なったそり変形が発生する。そのため，成形実験において成形品を金型から取り出した瞬間に発生したそりを α とし，これを初期そりと定義した。さらにその後室温で徐々に冷却され，樹脂収縮が安定した時点でのそりを β とし，これを最終そりと定義した。

また $\beta - \alpha$ は，図4に示したように， β と α の値から算出し，成形品を取り出し後から経時的に発生した総変位

Table 2 Results of warpage measurement

Molding parameter	condition	Actual molding			Analysis
		Initial warpage α (mm)	Final warpage β (mm)	Total deformation $\beta - \alpha$ (mm)	Final warpage β s (mm)
Material temperature (°C)	205	-1.719	0.424	2.143	3.387
	237	-1.470	1.735	3.205	4.215
Filling time (s)	1.3	-1.719	0.424	2.143	3.387
	5.0	-1.676	0.21	1.886	2.113
Holding pressure (MPa)	48.9	-1.719	0.772	2.491	2.193
	81.5	-0.216	2.261	2.477	4.337
Holding time (s)	5	-0.68	1.277	1.957	1.691
	10	-0.377	1.128	1.505	2.156
Cooling time (s)	10	-0.822	1.362	2.184	1.79
	20	-0.377	1.128	1.505	1.692
	30	-0.242	0.815	1.057	1.651

Fig. 2 Setting of restriction points in warpage analysis

Fig. 3 Definition of initial warpage and final warpage

量とした。

一方、数値そり解析で算出した成形品の最終そりを β_s と定義した。

3. 結果および考察

3.1 実成形と数値解析におけるそりの結果

表1で示した条件に基づき、実成形の初期そり α 、最終成形品そり β 、さらに総変位量 $\beta - \alpha$ の結果と数値解

Fig. 4 Definition of total deformation

Fig. 5 Displacements of deformed parts in warpage analysis

析で求めたそり量 β_s の結果を表2にまとめて示した。ここで樹脂温度を例にして説明すると、樹脂温度が 205°C の場合、実成形での初期そり α は -1.719 mm、最終成形品そり β は 0.424 mm、総変位量 $\beta - \alpha$ は 2.143 mm になった。237°C の場合、 α は -1.470 mm、 β は 1.735 mm、 $\beta - \alpha$ は 3.205 mm であった。同樹脂温度条件のそり解析結果を図5に示した。 β_s は 205°C で 3.387 mm、237°C で 4.215 mm を示した。

同様に、それぞれの実験条件における、そり量を実成形および数値解析で求めた。

3.2 実成形と数値解析の比較

実成形と数値解析を比較検討するため、図6に実成形における最終そり β と数値解析のそり β_s の関係を示した。また $\beta_s = \beta$ の直線をグラフに示した。このグラフにおいて、実成形の最終そり β と数値解析のそり β_s が全く同じ値を示せば、 $\beta_s = \beta$ の直線上にプロットされる。また、 β と β_s の条件依存性が同じであれば、その直線の傾きはプラスを示す。図6において、樹脂温度、充填時間、保持圧力、冷却時間は、直線の傾きがプラスとなり、すなわち実成形の最終そり β と数値解析のそり β_s は同様な条件依存性を示した。一方、保持時間は、直線の傾きがマイナスとなり、 β と β_s は異なる条件依存性を示した。ただし他の条件と比較し、条件の変化により、データの移動量が小さく、かつ $\beta_s = \beta$ の直線に近いことから、保持時間に

Fig.6 Relationship between β_s in warpage analysis and β in actual molding

Fig.7 Illustration of warpage behavior

関して、 β_s と β は近い値を示していると考える。

このように実成形でのそり挙動の条件依存性は、数値解析でおおよそ再現できた。

ただし、図6において $\beta_s > \beta$ の領域に、すべてのプロットが存在した。すなわちすべての条件において、数値解析のそり β_s は、実成形における最終そり β よりも大きな値を示した。

3.3 実成形と数値解析結果の差について

数値解析によるそり量が、実際の成形のそり量より大きくなったことについて図7で考察した。実際の成形においては、成形品を金型から取り出した瞬間に、金型曲率半径よりも小さくなる初期そり α が発生する。さらにそこを基点として、成形品の収縮が安定するまで、そり変形が継続し最終そり β が決定される。

ここで初期そりは、すべてマイナス方向に生じることから、成形品の製品表面側（型固定側面）よりも製品裏面側（型可動側面）の方が、瞬間的に大きな変形が起こったと考えられる。すなわち、製品裏面側に大きな残留応力が発生しており、それが瞬間的に開放したと推察する。

数値解析においては、成形品を金型から取り出すまでの

Fig.8 Relationship between $\beta_s - \beta$ and $|\alpha|$

間、金型内で成形品全体は不均一な収縮分布になっているが、型固定側と型可動側の接触部の樹脂は、金型表面に完全に固定されていると仮定している。従って、実成形のような製品表面側と裏面側に大きな応力の差が発生することではなく、初期そりは表現されない。このように数値解析では、金型形状を基点として、そこから成形品のそりが求められ、最終そり β_s が決定される。

以上のように数値解析においては、実成形で見られる初期そり α の現象が考慮されず、数値解析のそり β_s は実成形でのそり β よりも高い値を示したと考えられる。この原因とメカニズムについて今後明確にすることが、そり予測の大きな課題であると考ええる。

3.4 最終そり量の差異と初期そりとの関係

上記に示した β_s と β との差異と初期そり α との関係を明確にするため、図8のように縦軸に、数値解析の最終そり β_s と実成形の最終そり β の差 $\beta_s - \beta$ を、横軸に、実成形での初期そりの大きさ $|\alpha|$ （絶対値）を、各々の成形条件についてプロットした。

その結果、 $|\alpha|$ の増加により、 $\beta_s - \beta$ は増加する傾向にあった。ここで、ピアソンの相関係数を算出したところ、0.659であり、正の相関が見られた。

よって全体的な傾向としては、実成形における α の絶対値が大きくなると、数値解析の最終そり β_s はその分大きく算出され、予測精度が低くなる。

4. 結 言

本報では、そり挙動が観察しやすい大きな曲率半径の面を有する成形品形状を用いて、実際の成形実験と有限要素法を用いた数値解析を行い、成形品の最終そり量を比較し、詳細考察した。

その結果、以下のことを明らかにした。

- ①実成形と数値解析を比較した場合、成形品の最終そり量は、数値解析の方が大きい傾向にある。
- ②数値解析で算出した最終そり量と実成形での最終そり量の差は、実際の成形で見られる初期そりの量に相関がある。

参 考 文 献

- 1) 大塚弘己, 望月智仁, 大須賀晴信: 成形加工, **13** (2), 102 (2001)
 - 2) 山部 昌, 大塚弘己, 亀田隆夫, 瀬戸雅宏, 道井貴幸: 成形加工, **14** (11), 690 (2002)
 - 3) 松岡信一, 藤木武志: 塑性加工連合講演会講演論文集, 51 st, 463 (2000)
 - 4) MCILVAINE, J.: Des. 21 ST Century, 89 (1996)
 - 5) 四ツ柳真彦, 及川 功, 青葉たかし, 吉田豊満, 福本宏昭: 合成樹脂, **29** (11), 25 (1983)
 - 6) 浜田尊明, 是沢宏之, 檜原弘之, 鈴木 裕: 精密工学会九州支部地方講演会講演論文集 1997, 27 (1997)
 - 7) LEE B. H. and KIM B. H.: Soc. Plast. Eng. Annu. Tech. Conf., 54th (1), 692 (1996)
 - 8) 館山弘文, 土屋淳志, 小山清人: 成形加工, **15** (10), 694 (2003)
 - 9) プラスチック成形加工学会編: 成形加工における移動現象, 34 (1997), シグマ出版
 - 10) プラスチック成形加工学会編: 先端成形加工技術, 81 (1999), シグマ出版
 - 11) 射出成形辞典編集委員会編: 射出成形辞典, 316 (2002), 平河工業社
-