射出成形品におけるそり変形と金型温度分布との相関関係検討

村田 泰彦*・阿部 友康*・菅野 裕樹*・水澤 隆行*・
鈴木 一洋*・石川 和彦*・丸山 剛史*

Investigation on Relationship between Warpage of Injection Molded Products and Temperature Distribution in a Mold

Murata, Yasuhiko/Abe, Tomoyasu/Sugano, Yuuki/Mizusawa, Takayuki/
Suzuki, Kazuhiro/Ishikawa, Kazuhiko/Maruyama, Takeshi

Warpage is a serious problem for box-shaped injection molded products. In this study, we experimentally manufactured a mold in which sheath thermo-couples are installed at each part, to measure in-mold temperature distribution for various patterns of cooling channels and core inserts made of several materials. Using the mold, we investigated the correlation between temperature distribution and warpage, and then obtained the following results;

- (1) A clear correlation between warpage and temperature difference from the movable mold and stationary one was verified.
- (2) The increase in temperature difference brought about higher warpage. Furthermore, the decrease in temperature difference caused the warpage reduction by 20-30% when the arrangement patterns of cooling channels were changed.

Key words : Injection molding/Mold/Warpage/Mold temperature

1. 緒 言

射出成形は、電動式射出成形機の普及や、超高速射出成形¹⁾および超臨界発泡射出成形²⁾等の新しい成形技術の登場、さらに、金型の微細加工技術の進歩³⁾等により、レンズ、ディスク等の光学部品や、医療・電子デバイス等の高付加価値の精密製品の生産手段としてその用途を広げつつある。それに伴い、成形品の寸法精度や外観品質に対する要求も益々高まっている。

射出成形品に寸法誤差をもたらす不良現象として、そり変形が上げられる。そり変形が発生すると、製品の外観や部品同士の組み立て等に支障をもたらすために、生産現場において深刻な問題となっている。本研究において対象としている箱形状の成形品では、(1)成形品コーナー部の形状因子、(2)金型キャビティ側とコア側の温度不均一、(3)分子配向、さらに、(4)ガラス繊維やタルク等の充填材料では、充填材の配向等、これらの要因が成形品の収縮状況

に影響を及ぼし、そり変形が発現するものと考えられている^{4),5)}。上記(1)、(3)、(4)の要因によるそり変形は、樹脂の物性やキャビティ内での樹脂流動挙動に依存して発現するために、完全に抑止することが困難と考えられる。一方、(2)の要因によるそり変形は、3方向から樹脂の熱が移入するコア入れ子角部では、熱が蓄積され他の部分よりも冷却が遅れるために、成形品角部付近の表裏に温度差が生じ、それが収縮状況に影響を及ぼし、生成されるものと考えられている。そのため、金型温度の制御方法や金型構造等を工夫することで抑止が可能と考えられている。そこで、温度調節配管パターンや金型材質と、金型設定温度との関係の検討^{6),7)}や、CAE解析を利用した検討^{8),9)}等が行われている。しかし、成形過程における金型内の温度分布を詳細に計測して、実際の温度分布とそり変形との相関関係を実証的に明らかにした報告は見あらず、金型設計理論の体系化に向けての障害となっている。

このような現状から、本研究では、シース熱電対を各部に埋設した箱形状成形品の金型を設計・製作し、コア入れ子内の温度調節配管パターンとコア材質を変化させた場合における、金型内温度分布を計測し、成形品のそり量との相関関係について検討を行った。

* 日本工業大学機械工学科
埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1 (〒345-8501)
Nippon Institute of Technology 4-1, Gakuendai, Miyashiro-machi, Minamisaitama-gun, Saitama 345-8501 Japan
2008. 3. 17 受理

Fig. 1 Basic structure of a mold for measurement (units : mm)

2. 実験方法

2.1 金型および入れ子の基本構造

図1は、本論文で、設計・製作した金型温度分布計測用金型の基本構造を示している。本金型では、ダイレクトゲートの設けられたキャビティ入れ子とコア入れ子の交換が可能な構造となっている。成形品形状は、長さ100 mm×幅75 mm×高さ28 mm、厚さ2 mmの箱形状である。

入れ子の基本構造と金型温度調節のための配管パターンを図2に示す。また、金型温度分布を計測するためのシース熱電対の設置位置を図3に示す。まず、(1)のキャビティ入れ子は、材質を機械構造用炭素鋼S55Cとして、入れ子長手方向に平行に、ストレートの配管が4本設けられている。コア入れ子は、材質をS55Cとして、(2)のストレート型、(3)のコアの形状に沿って配管が折れ曲がったベント型、(4)の配管穴内にバッフルプレート（仕切板）を挿入したバッフルプレート型の3種類を製作した。キャビティおよびコア入れ子には、直径1.6 mmのKタイプ（アルメル・クロメル）のシース熱電対を挿入するための穴を3ヶ所ずつ設けた。シース熱電対は、コア入れ子の表面から5 mm離れた箇所に測定点が位置するように、また、図3に示すようにキャビティ入れ子とコア入れ子が組み合わされた際に、互いに対向する位置（①と⑥、②と⑤、③と④）に設置した。シース熱電対と挿入穴の隙間には、熱交換パイプ用グリスを満たした。

本論文では、コア入れ子の材質の影響についても検討を行った。表1にコア入れ子の材質と熱伝導率を示す。配管パターンはバッフルプレート型として、S55Cの他に銅製、アルミニウム製、さらに、図4に示すような、S55Cをベースとしてコアの4角に銅がインサートされた入れ子（以後、銅インサートと呼称する）を製作した。

2.2 成形条件

本実験の成形条件を表2に示す。樹脂は、日本ポリプロ（株）製のポリプロピレンMA1Bを用いた。本論文では、樹脂温度および設定射出率、保圧条件を一定として、金型温度調節機の冷却水の設定温度（以後、金型設定温度と呼称する）を3通りに変化させて計測実験を行い、それぞれの条件が、金型温度分布およびそり変形に及ぼす影響の検討

Fig. 2 Basic structure of insert block and arrangement patterns of cooling channels (units : mm)

Fig. 3 Insertion position of sheath thermo-couples (units : mm)

Table 1 Material of core insert block

No.	Material	Thermal conductivity (W/m·K)
1	Steel	50
2	Copper	403
3	Aluminum	236
4	Copper insert	—

を行った。実験に用いた金型温度調節機は、(株)松井製作所の最大流量 60 (l/min) の MCⅢ-60 HL である。計測実験は、40 ショットの連続成形を行い、その間のシース熱電対出力を記録した。射出成形機は、ファナック(株)製の最大型締力 490 (kN) の ROBOSHOT S-2000i50 A を使用した。

2.3 そり変形および密度の測定方法

図 5 は、成形品におけるそり変形量の定義と、成形品の密度測定位置を示している。本成形品では、内側方向へのそり変形が生成された。本論文では、各種条件で成形された 40 ショットの成形品の I 面と I' 面、II 面と II' 面の外形寸法 L_1 、 L_2 を、ノギスを用いて測定し、図中の式によりそり変形量を導出した。また、成形品密度の検討を行った。比重計 SP-1 M (Chyo Balance Corporation) を用いて、図 5(2) に示す I 面の A 部と II 面の B 部の比重をそれ

Fig. 4 Appearance of copper insert core block

Table 2 Molding conditions

Cylinder temperature (°C)	200-200-200-180-50*
Mold setting temperature (°C)	30/50/70
Set-up injection rate (cm ³ /s)	53.1
Holding pressure (MPa)	60
Pressure holding period (s)	14
Cycle time (s)	38

*) Nozzle-Metering-Compression-Feed-Hopper

ぞれ測定し、密度に換算した。

3. 実験結果および考察

3.1 金型温度の経時変化

3 通りの配管パターンのコア入れ子において、金型設定温度を 30℃ とし得られた 40 ショットの温度プロファイルの中から、21 ショット目を抽出して図 6 に示す。流動・保圧・冷却の各工程を明確にするために、成形機から出力された射出率および射出圧力信号を併記した。配管パターンや入れ子材質の違いにより、成形開始前に、コア側の温度がキャビティ側よりも 2℃ 程度高くなることを確認しており、以後では、この初期温度差が予め存在することを考慮して議論を行うこととする。まず、流動過程では、金型温度はほとんど変化せず、保圧過程に入って上昇を始める。しかし、すべての配管パターンにおいて、①から③のキャビティ側よりも、④から⑥のコア側の温度が高くなっている。特に、コア入れ子角部の⑤で計測された温度が最も高くなっている。ストレート型では、射出開始直前のコア側の温度がキャビティ側に比べて最高 10℃ 高くなっており、他の配管パターンに比べて冷却効率の低さを表している。なお、金型設定温度 50 と 70℃ においても同様の傾向を確認している。

パッフルプレート型配管を有する各種材質のコア入れ子において、金型設定温度を 30℃ とし得られた、19 ショット目の温度プロファイルを図 7 に示す。S55C では、全過程を通じて、①から③のキャビティ側よりも④から⑥のコア側の温度が高く上昇している。一方、銅、アルミニウム、銅インサートの場合では、S55C と比べて、上記コア側の温度の上昇が小さい。特に、銅では、温度上昇が最も小さくなっている。なお、この傾向は、金型設定温度 50 と 70℃ の場合においても同様に確認している。

3.2 配管パターンおよび金型材質と金型温度との関係

各種コア入れ子において得られた 40 ショットの温度プロファイルから、各ショットにおける温度の最高値（以後、ピーク温度と呼称する）を抽出して、ショット回数との関係として整理して図 8 に示す。なお、ピーク温度は、⑤が最高値を示す時刻における、それぞれのセンサの出力を読

(1) Definition of warpage

$$\text{Warpage in X-direction} = (71-L_1)/2$$

$$\text{Warpage in Y-direction} = (96-L_2)/2$$

(2) Measurement portion of density

Fig. 5 Definition of warpage and measurement portion of density in box-shaped molded product

Fig. 6 Mold temperature profiles measured in various arrangement patterns of cooling channels (Steel, Mold setting temperature : 30°C)

Fig. 7 Mold temperature profiles measured in core block of various materials (Baffle plate type, Mold setting temperature : 30°C)

み取った。ここでは、キャビティ側とコア側のピーク温度差が最も大きくなった②と⑤の、金型設定温度 30, 70°C の結果を掲げた。配管パターンおよび材質を変化させた場合に、S 55 C のストレート型において、1 ショットから 10 ショットにかけて、3°C 程度の上昇が見られる以外は、40 ショットを通じて、ピーク温度の大きな変動は見られない。また、キャビティ側②のピーク温度は、配管パターンおよびコア入れ子材質を変化させても、最高 2°C の差異しか見られない。一方、コア側⑤では、キャビティ側②に比べてピーク温度が高くなっている。(1)の配管パターンを変化

させた場合では、ストレート型においてピーク温度差が 20°C 前後と最も大きく、一方、ベント型とバッフルプレート型では 15°C 前後と小さい。また、(2)の材質を変化させた場合では、S 55 C のように熱伝導率の最も低い材質では、キャビティ側とコア側とのピーク温度差が最も大きく、そして、アルミニウム、銅インサート、銅の順に熱伝導率が増加するに伴い、ピーク温度差が減少している。

キャビティ側とコア側のピーク温度差を詳しく検討するために、バッフルプレート型において得られた①と⑥、②と⑤、③と④の温度比較を図 9 に示す。ここでは、金型設

Fig.8 Relationship between peak temperature and shot number in various arrangement patterns of cooling channels and core insert blocks made of various materials

定温度 30℃ の結果のみを掲げた。②と⑤のピーク温度差が最も大きく、例えば、S 55 C では、15℃ 程度と最も大きい。一方、①と⑥および③と④で小さく、例えば、S 55 C では、5℃ 程度で②と⑤の場合に比べて 1/3 程度となっている。なお、この傾向は、金型設定温度 50 と 70℃ の場合においても同様に確認している。

3.3 配管パターンおよび金型材質とそり変形量との関係

図 10 は、金型設定温度 30 および 70℃ の場合に、各種コア入れ子において得られた 40 ショットの成形品の X 方向と Y 方向のそり変形量を示している。まず、1 ショットから 40 ショットにかけて、ばらつきが見られるものの、そり変形量の大きな変化は見られない。S 55 C のストレート型でのそり変形量が最も大きく、バッフルプレート型が相対的に小さくなっている。また、各種材質でのそり変形量を比較すると、銅、アルミニウムのように熱伝導率が高いものほど、そり変形量が小さくなっている。

3.4 金型温度とそり変形量との関係

キャビティ側とコア側との温度差とそり変形量との関係の検討を行う。まず、各種コア入れ子における 40 ショットの連続成形において記録されたすべての温度プロファイルから、平均値を計算し、コア側とキャビティ側の差（以後、平均温度差と呼称する）を求めた。また、図 10 の 40 ショットの成形品のそり変形量の平均値を求めた。そして、得られた各種コア入れ子における、キャビティ側②とコア側⑤の平均温度差と、平均そり変形量との関係を図 11 に示す。(1)の X 方向では、平均温度差の増加に伴い、平均そり変形量が増加している。一方、(2)の Y 方向では、銅を除いて、X 方向と同様に、平均温度差の増加に

伴い、平均そり変形量が増加している。これは、平均温度差の増加に伴い、成形品角部分のキャビティ側とコア側の収縮率に差異が生じ、その結果、そり変形量が大きくなるためと推察される。最も平均温度差が大きくなった S 55 C のストレート型での平均そり変形量を基準とすると、配管パターンや材質を変更して平均温度差を 0℃ に調節することによって、そり変形量が 20～30% 改善されることがわかる。

3.5 そり変形と成形品密度との関係

図 11(2)において、銅製コア入れ子では、平均温度差が最も小さいにも関わらず、Y 方向の平均そり変形量がアルミニウム、銅インサートの場合に比べて、若干大きくなる特異な現象が確認された。ここでは、その原因について考察する。各種材質のコア入れ子において、金型設定温度 50℃ で得られた成形品から、図 5 の I 面の A 部と II 面の B 部の密度を測定した結果を図 12 に示す。銅以外の材質では、I 面と II 面の密度がほぼ同じ値を示すのに対して、銅では、I 面に比べて II 面の密度が小さくなっている。銅では、熱伝導率が最も高いために、コア入れ子の冷却効率が高まり、樹脂の固化が促進される。例えば、図 7(2)で見られた、コア側の温度が他の材質ほど上昇しない傾向が、これを裏付けている。そのため、保圧過程において、ゲートから遠く離れて固化が進行する II 面と II' 面よりも、ゲートから近い I 面と I' 面へと樹脂が選択的に流入し、II 面と II' 面の密度が小さくなる。その結果、I 面と I' 面よりも、II 面と II' 面の成形収縮が大きくなり、そり変形量が増加したものと推察される。なお、PP は結晶性樹脂であるため、緩やかに冷却される I 面と I' 面では、II 面と

Fig. 9 Relationship between peak temperature and shot number in each measurement position (Baffle plate type, Mold setting temperature : 30°C)

Fig. 10 Relationship between warpage and shot number in various arrangement patterns of cooling channels and core insert blocks of various materials

Ⅱ' 面に比べて結晶化度が増加し、その結果、Ⅰ面とⅠ'面の成形収縮が逆に大きくなるものと考えられた。しかし、上記結果から、この場合では、冷却速度差によって生じる密度差よりも、保圧過程での補償流動に基づく圧力負荷状況の違いによる密度差の方が、そり変形に大きく影響した

ものと推察される。

4. 結 言

コア入れ子の温度調節配管パターンと材質を変化させた場合における、金型温度分布と成形品のそり変形量との相

Fig. 11 Relationship between warpage and temperature difference in various arrangement patterns of cooling channels and core insert blocks made of various materials

Fig. 12 Density values at various portions of molded products (Baffle plate type, Mold setting temperature: 50°C)

関関係について検討を行った。得られた結果を以下に列記する。

- (1) 配管パターンを変化させた場合では、ストレート型において、キャビティ側とコア側との温度差が最も大きくなり、バント型とバッフルプレート型が小さくなる。
- (2) コア入れ子材質を変化させた場合では、熱伝導率の増加に伴い、キャビティ側とコア側との温度差が減少する。
- (3) そり変形量は、ストレート型で最も大きく、バッフルプレート型が相対的に小さくなる。また、コア入れ子材料の熱伝導率の増加に伴い、そり変形量が減少する。
- (4) キャビティ側とコア側との温度差の増加に伴い、そり変形量が概ね増加する。配管パターンやコア入れ子材質を変更して温度差をなくすことによって、そり変形量が20～30%低減される。
- (5) 銅のようにコア入れ子の冷却効率が高い場合には、成

形品の密度が局部的に変化し、キャビティ側とコア側の温度差が小さいにも関わらず、そり変形量が大きくなることもある。

以上のように、金型温度分布とそり変形量との間に明確な相関関係があることを、計測を用いて実証的に明らかにした。本論文で得られた知見は、箱形状成形品のそり変形の抑止に対して、具体的な指針を与えるものと考えられ、今後の活用が期待される。

おわりに、射出成形機および金型温度調節機を貸与下さった(株)サン精密化工研究所、(株)松井製作所、さらに、樹脂を提供下さった(株)三菱化学科学技術研究センターに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 廣恵章利編：超高速射出成形技術，154(1999)，三光出版社
- 2) 津田文朗：成形加工，**13**(2)，83(2001)
- 3) 早乙女康典：精密工学会誌，**69**(9)，1221(2003)
- 4) Takahara, T., Yoshinaga, M. and Mizuno, T.: 2005 SAE International, 05 AC-45(2005)
- 5) 高原忠良，古橋 洋，前田秀典，井ノ山達也，小山清人：成形加工，**20**(3)，193(2008)
- 6) 高橋重晶，関野英一郎，小林博行：成形加工 '96，145(1996)
- 7) 高橋重晶，関野英一郎，小林博行：成形加工 '97，311(1997)
- 8) 多田和美：成形加工，**10**(5)，298(1998)
- 9) 大井秀人：成形加工，**14**(9)，566(2002)