

デジタルものづくりによる不良レス射出成形技術の開発（第3報）

6 予測式によるそり変形のコントロール

松永尚徳、丸本翼、西田裕紀、佐川洋行、寺山朗、小玉龍

Control of Warpage in Injection Molding Using Regression-Based Prediction Models

MATSUNAGA Hisanori, MARUMOTO Tsubasa, NISHIDA Hironori, SAGAWA Hiroyuki,
TERAYAMA Akira and KODAMA Ryu

This study optimized molding conditions to simultaneously eliminate two types of warpage (horizontal and vertical) in injection-molded products using regression-based prediction models. The initial models exhibited low accuracy due to the different mechanisms governing inward and outward warpage, necessitating separate model creation. To address this, separate models were created, improving prediction accuracy from $R^2 = 0.77$ to 0.93. The refined models enabled precise warpage control, achieving a balanced product quality and demonstrating the superiority of data-driven prediction models over traditional operator-based condition setting.

キーワード：重回帰分析、射出成形、そり変形、成形条件最適化

1 緒 言

射出成形は、加熱・溶融した樹脂を金型に射出し、冷却・固化させて成形品を得る工法である。後加工なしで複雑な形状に対応でき、大量生産にも適していることから、樹脂製品の主要な製造手法として広く普及している。一方、樹脂は温度・圧力・成形速度に依存して特性が大きく変化し、さらに成形工程で溶融状態から固体へと相変化を伴う。そのため、狙いどおりの成形品を得るには、金型の修正や成形条件の調整が必要となることが多い。

従来の経験則に基づく設計や成形条件の設定だけでは、複雑な成形品の品質を正確に予測することが難しい。この課題に対処するため、金型内の溶融樹脂の流動・冷却・固化の挙動を計算し、成形状態や品質を予測する射出成形 CAE が普及している。我々はこれまでに、固化温度付近の粘度を計測することで、射出成形 CAE の流動解析精度が向上することを第1報として報告した¹⁾。

しかし、現代の射出成形 CAE でも計算に反映できない要因があり、実際の成形を完全に予測することは困難である。例えば、可塑化条件（スクリー回転数や背圧）や、成形機周辺の温度・湿度といった環境要因が影響を及ぼす。そのため、射出成形 CAE を活用して主要因と成形品質の因果関係を把握しながら成形品設計と金型製作を行い、最終的には成形機オペレーターの経験と勘に基づいた調整によって、要求される成形品質を確保するのが現状である。

第2報では、成形条件をよりの確に導出することを目的とし、重回帰分析による成形品質の予測式を生成する予測式作成ツールを開発した。このツールで導出した予測式を用いて環境要因の影響を考慮しながら、バリとシ

ョートショットが併発する実験金型において、バリを抑えつつ充填性を向上させる成形条件を導出した。また、データを追加して再学習することで、予測精度が向上することも示した²⁾。

本研究では、予測式作成ツールを用いて、同一の成形品に発生する2種類のそり変形について、予測式を活用することで、その同時解消を実現したことを報告する。

2 成形計測実験

2.1 成形対象と使用機器

本研究では、約 180×90×45mm の箱形状のダイレクトゲート成形品を対象とし、成形材料にはポリプロピレン（株プライムポリマー製、プライムポリプロ J106G）を使用した。この成形品は、面によって1～3mmの範囲で異なる板厚を有し、成形条件によってそり変形の様子が大きく変化することを事前解析で確認している（図1）。

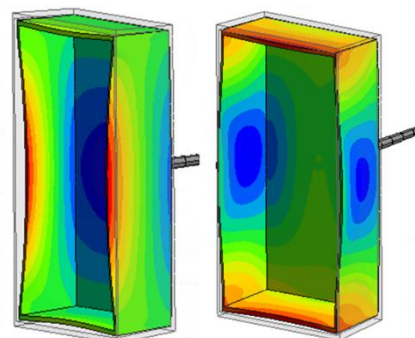


図1 そり変形の様子（事前解析）

成形には、(株)日本製鋼所製の電動射出成形機「J80ADS-110U」と、集中管理システム「J-WiSe NET100®」を使用し、成形機の最大射出圧力や射出時間等の実測値をショットごとに収集した。金型温調には(株)カワタ製の「TWK-75MD」を使用し、流路を分岐させることで、1台の温調器でキャビティ型とコア型を温度調整した。

また、1年を通じて4回に分けて成形実験を行い、環境要因として気温・湿度・気圧を含めてデータを収集した。成形条件を適宜変更しながら、成形品のそり変形と成形条件の関係を評価した。

2.2 そりの定義

成形材料は結晶性樹脂のポリプロピレンであるため、成形からしばらくは収縮により寸法変化を伴う。成形から2週間保管後、コニカミノルタ(株)製のモノクロ複合機「bizhub 361i」を用いて解像度300DPIでスキャンした。得られた画像データから図2に示す4つの寸法(横腹、横角、縦腹、縦角)を算出し、式(1)～(3)により横そり、縦そり、全そりを定義した。本研究では、全そりが0となる成形品を得ることを目標として、最適成形条件を予測式による導出を試みた。

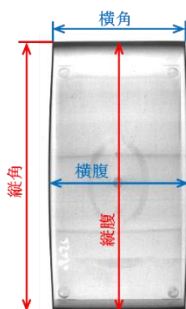


図2 そりの算出に用いた寸法

$$\text{横そり} = \text{横腹} - \text{横角} \quad (1)$$

$$\text{縦そり} = \text{縦腹} - \text{縦角} \quad (2)$$

$$\text{全そり} = |\text{横そり}| + |\text{縦そり}| \quad (3)$$

3 予測式の作成

3.1 目的関数と説明変数

第2報で報告した予測式作成ツールを活用して、成形計測実験で収集したデータから予測式を導出した。この予測式は、べき関数を基にした重回帰モデルを用いており、フィッティングの自由度が高いことが特長である。

表1に予測式の目的関数と説明変数を示す。本研究では、全そりが0となる成形条件を求めることを目標とする。全そりは横そりと縦そりの絶対値の和で、それらは4つの寸法から算出している。この4つの寸法を目的関

数として、4つの予測式を作成した。

説明変数としては、射出成形機の設定値、動作実測データ、金型内に設置した各種センサーの計測値等が考えられる。しかし、例えば金型内の溶融樹脂圧力センサーの値を説明変数として予測式を作成した場合、その予測式からそりを抑制する溶融樹脂圧力の値が求めたとしても、その圧力値を直接的に設定することはできず、試行錯誤の調整が必要となる。そこで、予測式の有効性を高めるため、説明変数は成形条件(設定値)として、最適成形条件を直接的に設定できるようにした。なお、本研究では成形の制御段数について、射出工程と可塑性・計量工程は1段制御、保圧工程は最大3段制御に限定した。保圧工程の設定は、保圧圧力と保圧時間を入力するが、圧力制御の履歴を考慮するために、図3に示すように保圧圧力と保圧時間の時系列的な関係をグラフ化し、二次元形状(塗潰し部分)の重心位置を算出して保圧圧力(重心)、保圧時間(重心)とした。さらに、二次元形状(塗潰し部分)の面積を算出して保圧面積とした。

なお、本研究での実験においては、キャビティ型とコア型を1台の金型温調器で調温しており、調温媒体の流量バランスや温度バランスを調整できない。そのため、金型温度差は環境因子として扱った。

表1 目的関数と説明変数

項目	説明
目的関数	
横腹、横角、縦腹、縦角	画像データから算出した寸法
説明変数	
成形条件	
射出速度、スクリー回転数、背圧	設定値
保圧圧力(重心)	保圧工程の設定値から重心位置と面積に数値変換(図3)
保圧時間(重心)	
保圧面積	
成形品情報	
重量	実測値
環境因子	
気温、湿度、気圧	実測値
金型温度差(キャビ・コア間)	金型内熱電対による実測値

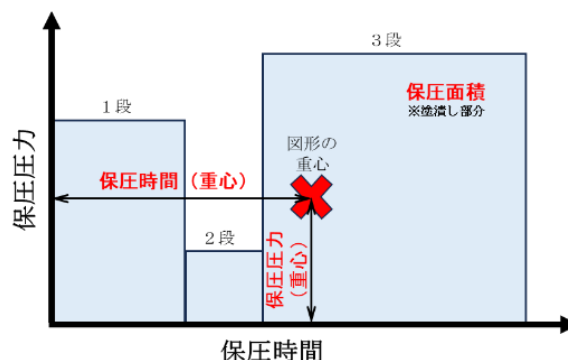
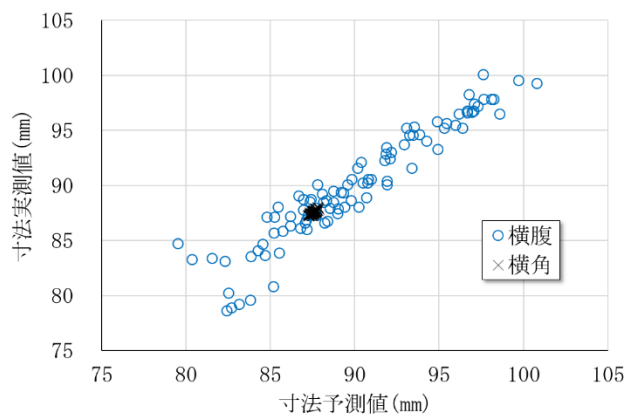


図3 保圧工程の説明変数

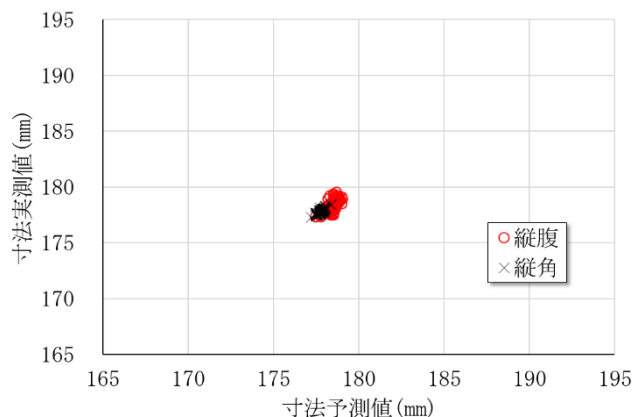
3.2 予測式の作成

成形計測実験で収集したデータを、Excel の表形式にとりまとめて予測式作成ツールで反復計算して予測式を作成する。作成された予測式について、目的関数に対して影響の最も小さい説明変数を省き再作成することを、11 個あった説明変数を 5 個まで繰り返して予測式を決定した。それを算出するための 4 つの寸法に関する予測式について、横軸に成形条件から予測式により算出した予測値、縦軸に実測値として、**図 4** に示す。4 つの寸法のうち、横腹は変化範囲が広く、他の 3 つの寸法は変化範囲が小さいことが分かる。また、特に横腹の 85mm より小さなものに対しては、予測精度が悪くなっていることが分かる。

4 つの寸法から **式 (1) ~ (3)** により算出した横そり、縦そり、全そりの予測精度を **図 5** に示す。横そりと比べると縦そりの変化範囲は小さい。また、横そりのマイナス（内そり）領域の予測精度が悪く、これが全そりの予測精度の低下の主たる要因となり、 R^2 値（決定係数）は 0.77 となった。

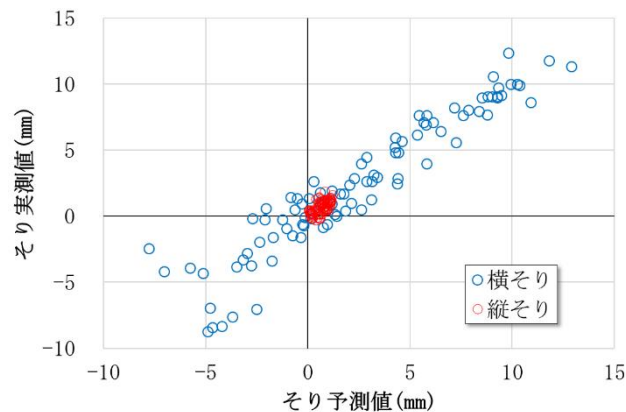


(a) 横腹および横角の予測精度

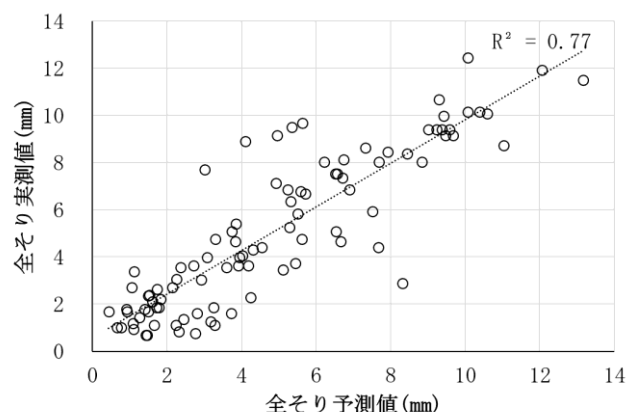


(b) 縦腹と縦角の予測精度

図 4 4 つの寸法に関する予測精度



(a) 横そりおよび縦そりの予測精度



(b) 全そりの予測精度

図 5 そりの予測精度

3.3 目的関数の再検討

内そりは金型内の圧力不足や冷却不均一による収縮が主要因であるのに対し、外そりは過剰な保圧による熔融樹脂の供給過多が主要因でと考えられ、これらを同一のモデルで表現するのは精度低下の一因となる。

そこで、保圧工程の成形条件に閾値を設定し、横そりを内そりと外そりに区分して 2 つの予測式を作成した (**図 6**)。外そりの学習範囲には若干の内そりデータを、内そりの学習範囲には若干の外そりデータを含むよう閾値を調整した。一方、縦そりは変化範囲が小さく、全そりへの影響も小さいため、1 つの予測式とした。

なお、予測式の説明変数は変更していない。

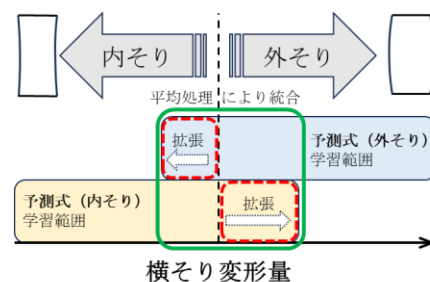


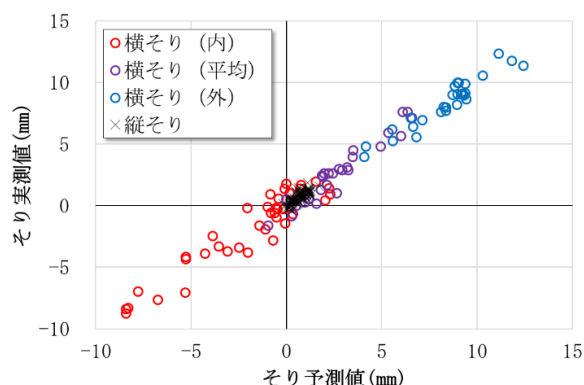
図 6 横そりの区分

3.4 予測式の再作成

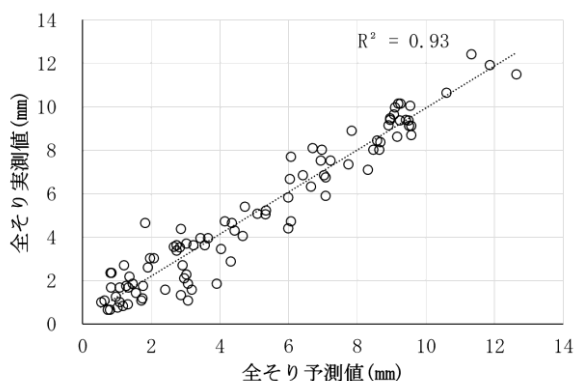
目的関数を再検討後の予測精度を図7に示す。前述のとおり、横そりに関しては、内そりと外そりに区分けして2つの予測式を作成し、そのオーバーラップ部分は平均処理したものを予測値とすることで統合した。

これにより計算された全そりの R^2 値は0.93(図7(b))となり、予測式の再作成前の0.77(図5(b))から大きく改善できた。

このことから、重回帰分析により予測式を作成する場合、発生している現象を考察して予測式を構成することが、予測精度を高めるために重要となることが明らかとなった。



(a) 横そりおよび縦そりの予測精度



(b) 全そりの予測精度

図7 目的関数を再検討後の予測精度

3.5 そり変形のコントロールの可能性

そり変形の分布図を図8に示す。横軸に横そり、縦軸に縦そりとし、○の大きさは成形品重量(最小 51.0g、最大 57.2g)を示す。4回に分けて成形計測実験を行い、データ収集の範囲を広げながら、そりが小さくなる成形条件を予測式により導出した。また、成形計測実験の都度、得られたデータを加えて予測式は再学習を行った。

また、射出成形技能者が成形条件を決定した実験1回目において、成形品重量が大きいほど横そりが大きく、

縦そりが0に近づく傾向が強く発生した。予測式により成形条件を導出することで、横そりが小さく、重量が比較的大きな成形品を成形できる条件を導出できるようになり、さらに横そりと縦そりが同時に、ほぼ0となる成形条件も導出できるようになった。以上のことにより、データを加えながら再学習しながら予測式を活用することで、少なくとも本研究の実験環境においては、そり変形をコントロールできることが分かった。

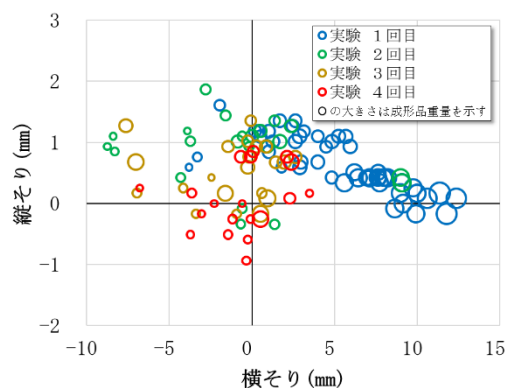


図8 そり変形の分布図

4 結 言

成形品に2種類のそり変形が同時発生する射出成形において、蓄積した成形データを基にした重回帰分析による予測式を作成して最適化し、そりの同時解消を行った。その結果、次のことを明らかにした。

- (1) 重回帰分析で作成した予測式により、2種類のそり変形を同時解消する成形条件の導出が可能である。
- (2) 予測精度を向上させるには、発生現象を十分に考察し、適切な目的関数の設定が重要である。
- (3) 予測式の精度向上により、射出成形技能者の経験では導き出せない成形条件の提案も期待できる。

謝 辞

本研究は、広島大学デジタルものづくり教育研究センターとの共同研究「データ駆動型スマートシステム」プロジェクトで得られた成形品および計測データを活用したものである。ここに感謝の意を表す。

文 献

- 1) 松永他：広島県西部工技研究報告 66(2023), 1
- 2) 松永他：広島県西部工技研究報告 67(2024), 1