

## 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2報)

### 1 不良削減に役立つ予測式作成ツールの開発

松永尚徳、西田裕紀、丸本 翼、佐川洋行、寺山 朗、小玉 龍

Viscosity measurement near solidification temperature of resin

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

We created a prediction formula for the projected area of the molded product and the burr area for injection molding using a mold that generates burrs when completely filled. We verified the prediction formula and clarified the following. (1) By creating a prediction formula, it is possible to visualize the magnitude of the influence that molding conditions etc. have on the filling amount and burr area. (2) If the prediction accuracy is insufficient, it is possible to improve the prediction accuracy by adding data that deviates from the prediction and actual measurement and performing re-learning.

キーワード：重回帰分析、射出成形、不良削減、データ分析

## 1 緒 言

射出成形は、加熱・溶融した樹脂を金型内に射出し、冷却して固化させた後に金型内から取り出して成形品を得る工法である。後加工なく複雑な形状に対応でき、大量生産にも適する工法であることから樹脂製品の代表的な製造工法の一つとして広く普及している。一方、高分子材料である樹脂は、温度や圧力、成形速度に依存して様々な特性が大きく変化し、更に工程中に溶融状態から固体へ相変化を伴う。そのため、狙いどおりの成形品を得るには金型修正や、成形条件の調整が必要となることが多い。これまでの経験による設計手法や成形条件だけでは、複雑な成形品の品質を予測することが難しいため、金型内の溶融樹脂の流動・冷却・固化の挙動を計算して成形状態や成形品質を予測する射出成形 CAE の普及が進んでいる。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 において溶融樹脂の流動の解析精度が向上することを報告している<sup>1)</sup>。

しかしながら、現代の射出成形 CAE においても、計算に反映できない要因もあり、実成形を完全に予測することは不可能である。例えば、可塑化条件のスクリュウ回転数や背圧といった成形条件や、成形機周りの温度や湿度等の環境要因がこれに該当する。したがって、射出成形 CAE を用いて主要要因と成形品質の因果関係を把握して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り、要求される成形品質を確保する状況となっている。

本研究においては、成形条件をよりの確に導出することを目的として、重回帰分析により成形品質を予測する予測式を作成し、成形条件や環境要因の影響を考察した。

## 2 予測式作成ツールの開発

### 2.1 重回帰分析

特定の結果について複数の要因がどのように影響しているかを分析する手段の一つとして、統計的手法である重回帰分析が使われており、最もシンプルなモデルは式(1)に示す線形重回帰式である。

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i \quad (1)$$

$Y$  : 目的関数

$X_i$  : 説明変数

$\beta_0$  : 切片

$\beta_i$  : 偏回帰係数

$k$  : 説明変数の個数

線形重回帰式は、偏回帰係数の特定が容易ではあるが、非線形な現象を精度よく表すことはできない。本研究において、様々な現象に対応すべく式(2)を重回帰式とした。

$$Y = a + \sum_{i=1}^k b_i (X_i + c_i)^{d_i} \quad (2)$$

$Y$  : 目的関数

$X_i$  : 説明変数

$a$  : 切片

$b_i, c_i, d_i$  : 偏回帰係数

$k$  : 説明変数の個数

この重回帰式は、一つの説明変数につき三つの偏回帰係数で構成することで、自由度を高めており、図1に示すように偏回帰係数 $d_i$ により曲線形状が多様に変化するためフィッティングの自由度が高い。また、0から無限

大までの区間途中において、極大・極小が存在しないため、得られる回帰式に特異解が生じにくい利点がある。

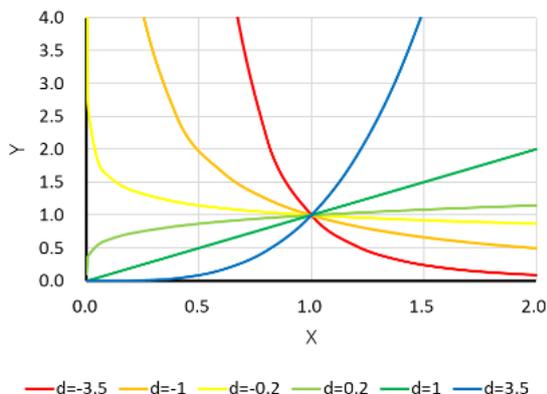


図1  $Y = X^d$ のグラフ

## 2.2 予測式の調整と評価

本研究においては、最小二乗法により実験データと重回帰式による計算値の乖離が小さくなるように式(2)の切片と偏回帰係数を反復計算により調整する。以降、この調整により得た重回帰式を予測式と表す。

また、回帰式の有効性の指標の一つとして、式(3)に示す決定係数 $R^2$ が使われている。これは、データの全変動のうち回帰式で説明できる変動の割合を示す。重回帰分析では、説明変数が増えることにより重回帰式の自由度が高まり決定係数は1に近づくため、説明変数の数を考慮した自由度調整済み決定係数により評価することが一般的である。予測式は、説明変数1個当たり三つの偏回帰係数を有するため、自由度調整済み決定係数 $R_f^2$ を式(4)と定義した。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (3)$$

$$R_f^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \cdot \frac{n-1}{n-3k-1} = 1 - (1 - R^2) \cdot \frac{n-1}{n-3k-1} \quad (4)$$

$Y_i$  : 実際のデータ

$\hat{Y}_i$  : 予測値

$\bar{Y}$  : データの平均値

$n$  : データの個数

$k$  : 説明変数の個数

## 2.3 予測式作成ツールのプロセスと主要機能

予測式を簡便に得るため、マイクロソフト製 Excel を用いて予測式作成ツールを開発した。Excel のソルバー

機能を用いることで最小二乗法により重回帰式を算出することができるが、その解は各偏回帰係数の初期値に依存する。そのため、マクロ機能を活用して反復計算させた。予測式作成ツールの大まかなプロセスと主要機能は次のとおりである。

- ① 計算マトリクス作成：目的関数と説明変数をマトリクス形式のデータとしてシートに貼り付けると、各データを標準化して、偏回帰係数を反復計算で求めるための計算マトリクスを作成する。目的関数と説明変数の関係が、正の相関や負の相関であることが明らかな場合は、そのように解の探索範囲を限定することも可能である。
- ② 反復計算：実測値と予測値の乖離が小さくなるように最適解を反復計算で探索する。予測式の自由度調整済み決定係数 $R_f^2$ が目標に達すると反復計算を終了する。
- ③ 予測式の分析：得られた予測式を基に、各説明変数の実験値の入力範囲について、目的関数に寄与する影響度をグラフ化する。
- ④ 最適解の導出：得られた予測式を基に、目的関数の目標値を実現する各説明変数の値（最適解）を算出する。最適解の探索範囲は、実測値の入力範囲に限定する。

## 3 予測式による分析事例

### 3.1 成形機器と成形品

ここで予測式による分析事例として、射出成形においてバリを抑えながら可能な限り樹脂を充填した事例を記す。(株)日本製鋼所製電動射出成形機 J80ADS-110U と図2に示す成形品板厚が4mm、3mm、2mm、1mmの部位で構成するバリとショートショットの実験用金型を用いた。なお、ショートショットは成形品に未充填部分が発生し、バリは成形品の外に樹脂が溢れ出る成形不良である。

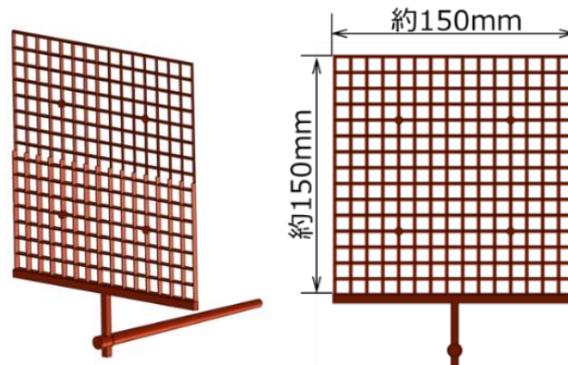


図2 バリとショートショットの実験成形品（概略図）

この実験用金型は、完全充填させると**図3**のようにバリを発生するものである。また、(株)日本製鋼所製大規模集中管理システムプログラム「J-WiSe NET100®」を用いて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。得られた成形品はコニカミノルタ(株)製複合プリンターbizhub 368eを用いて画像としてスキャンし、境界処理することで成形品投影面積とバリ投影面積を算出した。気温、湿度、気圧といった環境要因を考慮するため、1年を通して4回に分けて成形条件を適宜変更しながら成形実験を行い、成形品質と成形条件を収集してデータベースを構築した。

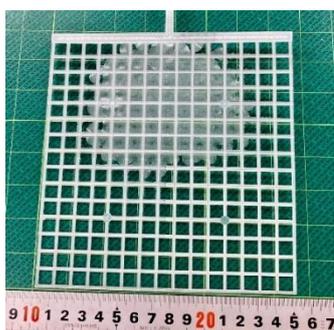


図3 完全充填時のバリの様子

### 3.2 目的関数と説明変数

データベースから定常状態となったショットを抽出し、**表1**に示す項目を目的関数と説明変数として予測式を作成した。説明変数は、成形を直接的にコントロールできる成形条件、容易に計測可能な項目、成形条件から算出できる項目から選定し、予測式の自由度調整済み決定係数 $R_f^2$ が高まるようにトライ&エラーで決定した。

ここで、使用樹脂の粘度構成式(Cross-WLF)を基に、仮想的なせん断速度0における粘度 $\eta_0$ をシリンダ温度から算出して説明変数に加えた。

また、計量工程においては背圧を加えることで熔融樹脂が圧縮されて比重が増す効果が想定される。それを考慮するため、NET100 記録値から保圧完了時から計量完了時までのスクリー移動量を可塑ストロークと定義し、これに背圧を積算したものを説明変数として加えた。

表1 目的関数と説明変数

項目	入手方法・備考
目的関数	
投影面積、バリ面積	成形品画像から算出
説明変数	
射出時間、背圧、シリンダ温度、	NET100 記録値
保圧圧力、保圧時間、スクリー回転数	成形機設定値
気温、湿度、気圧	温湿度・気圧計
粘度 $\eta_0$	粘度構成式
保圧圧力×背圧、保圧圧力×背圧/粘度	説明変数の演算
可塑ストローク×背圧	NET100 記録値の演算

### 3.2 ショートショットとバリの対策方法の分析

予測式作成ツールにより得られた分析結果から、ショートショットとバリの対策方法について考察を行った。ショートショットに対しては、シリンダ温度を上げて射出時間を短く(射出速度を速く)し、保圧圧力を高くすることが一般的な改善手法である。投影面積に対して影響の大きい上位五つの説明変数の影響度を**図4**に示すがこの一般的な手法とよく一致している。また、背圧を高めることでより充填されることが示唆され、それぞれの要因の効果をグラフ化することができた。なお、得られた成形品投影面積の予測式の $R_f^2$ は0.98に達した。

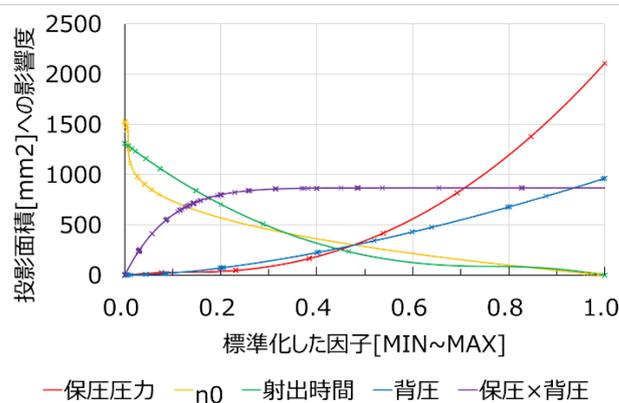


図4 成形品投影面積に対する説明変数の影響

バリに対しては、**図5**に示すように保圧圧力と背圧を高めること、粘度を下げる(樹脂温度を高める)ことで、発生リスクが高まる結果となった。また、求めた予測式においては、湿度の影響が強く、高湿度の環境下ではバリが抑制される傾向となっている。なお、求めた予測式の $R_f^2$ は0.89に留まり、ショートショットと比較すると予測精度が低い。バリの正確な予測には**表1**に示す説明変数では十分ではなかったものと考えられる。

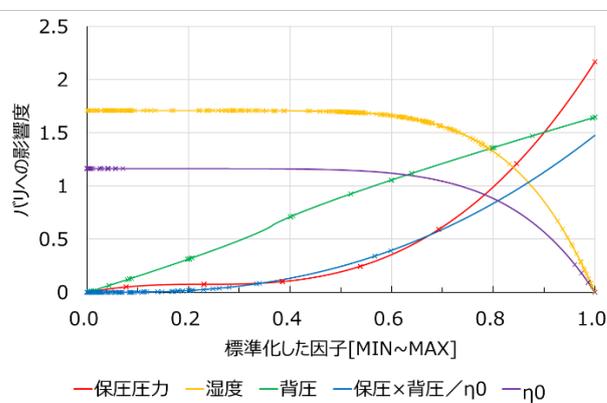
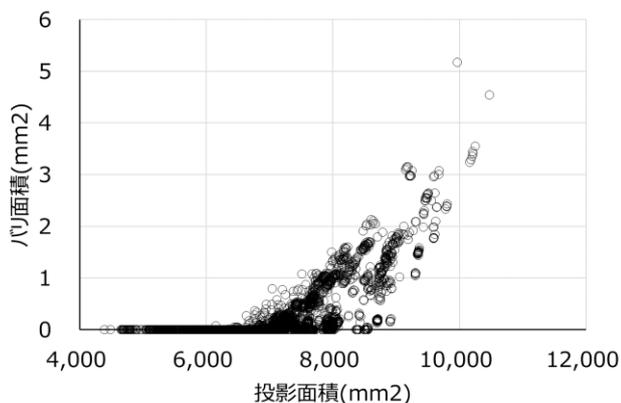


図5 バリ面積に対する説明変数の影響

### 3.3 予測精度の検証

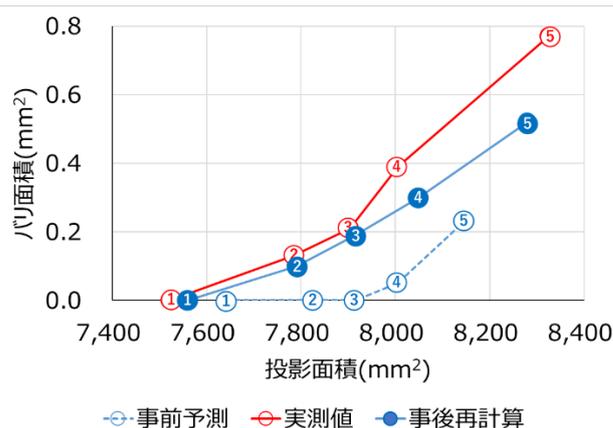
横軸を成形品の投影面積、縦軸をバリ面積として、データベースに収集した約 5,100 ショットのデータ分布図を **図 6** に示す。バリと成形品の投影面積の関係は一様ではなく、成形条件によりバ리를抑制しつつ充填可能とする成形条件が存在することを示す。



**図 6 データ分布図 (バリ面積と投影面積)**

また、求めた予測式により、バ리를抑制しながらより充填可能な成形条件を求めることができる。その予測精度の検証実験の結果を **図 7** に示す。これは、予測式によりバ리를抑制しながら充填が大きくなる成形条件を算出し、その条件をある程度変更させて、投影面積とバリ面積の変化を求めたものである。グラフ中の○は予測式による事前予測、○は実験による実測値、●は実測値を含めて再構築した予測式による事後再計算を示し、それぞれの丸数字は同一の成形条件での比較となる。事前予測では、投影面積 7,900mm<sup>2</sup> までバ리를発生させずに成形可能としていたが、実際に成形実験を行った結果 7,800mm<sup>2</sup> でバリが発生した。この実験の後、実験データを加えて再学習させることにより、予測精度が向上することが確認できた。

これにより、予測精度が不十分な予測式に対して、乖離の生じたデータを加えて再学習させることで、予測精度を向上させることが可能であることが示された。



**図 7 予測精度の検証結果**

## 4 結 言

完全充填するにはバリ発生が抑制できない実験金型を用いた射出成形において、成形品投影面積とバリ面積の予測式を作成し検証を行い、次のことを明らかにした。

- (1) 予測式を作成することで、成形条件等が充填量とバリ面積に与える影響の大きさを可視化できる。
- (2) 予測精度が不十分な場合、予測と実測が乖離したデータを加えて再学習させることで、予測精度の向上が可能となる。

## 謝 辞

本研究におけるバリと充填量の予測式の作成において、広島大学デジタルものづくり教育研究センター及び株式会社日本製鋼所との共同研究による「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実験データを活用させていただきました。ここに感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) 松永他：広島県西部工技研究報告 66 (2023), 1