

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1報)

1 樹脂の固化温度付近における粘度計測

松永尚徳、丸本 翼、西田裕紀、佐川洋行、寺山 朗、小玉 龍

Viscosity measurement near solidification temperature of resin

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

Injection molding is a process in which molten resin is injected into a mold, cooled to solidify, and then removed from the mold to produce a molded product. Simulation is used to design the product shape and mold, and the acquisition of several resin properties is essential for accurate analysis.

In this study, we developed a simple method for measuring viscosity, which increases rapidly near the solidification temperature as the resin cools. By applying it to an injection molding simulation, it was found that short shots could be predicted with high accuracy.

キーワード：射出成形、粘度計測、シミュレーション、ショートショット

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成形品を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特徴があ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、さらに溶融状態から固体へ相変化するときに収縮する。この複雑な特性をもつ樹脂を材料とする射出成形は、成形品の品質を直感的に予測することは難しく、狙い通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。そのため、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。

射出成形 CAE の実施には樹脂の物性情報が必須であり、その一つに粘度がある。粘度は、温度とせん断速度と圧力に依存することが知られており、その測定値にフィッティングさせた粘度構成式を射出成形 CAE に反映させることで、射出成形を精度良く予測することが可能となる。一般的に、粘度の計測にはキャピラリーレオメーターが用いられる。しかしながら、キャピラリーレオメーターと射出成形機では、樹脂の溶融方法や流動速度が根本的に異なるため、より実際の成形に即した粘度計測が必要である。そのため、当センターでは、射出成形機と特殊金型を用いた計測手法を開発してきた^{1)~3)}。また、固化温度付近においては、キャピラリーレオメーターや射

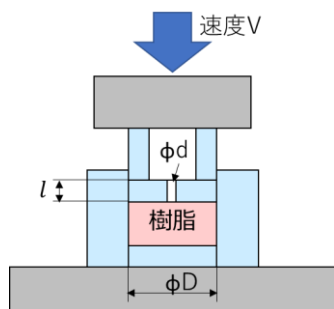
出成形機では樹脂を流動させることができないため、成形温度付近で計測した粘度に対して粘度構成式をフィッティングして、成形温度より低温の領域は粘度構成式の外挿による値を用いて計算して予測することがほとんどである。これは、溶融樹脂が冷却されることによる粘度の急激な上昇を過小評価することにつながり、射出成形 CAE で樹脂の流動パターンやショートショットを正確に予測することが困難な要因の一つとなっている。

そこで、固化温度付近での粘度計測を可能とする簡便な計測手法を考案した。本研究ノートでは、その計測値を基にフィッティングした粘度構成式を射出成形 CAE に適用し、その解析精度の向上効果について報告する。

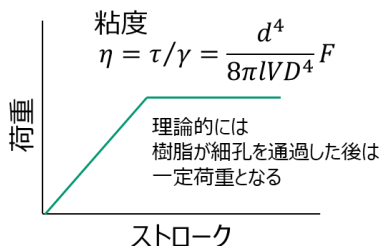
2 固化温度付近の粘度計測

2.1 計測原理

図1は考案した固化温度付近での粘度計測を可能とする装置の模式図である。計測原理はキャピラリーレオメーターと同様で、計測装置の内部に測定対象となる樹脂を設置し、溶融した樹脂が細孔を通過する時の一定となった荷重 F と計測装置の各部寸法、試験速度から粘度を算出することができる。固化温度付近は成形温度付近と比較すると、100 倍を超える粘度となり、それに比例した高荷重の計測が必須となる。そのため、荷重付加にはキャピラリーレオメーターよりも高荷重に対応できる万能試験機を用いた。また、装置構成部品に変形が発生するリスクが高まるが、構成部品のうち変形した部品は交換することで対応した。



(a) 計測装置の模式図



(b) 粘度の算出

図1 固化温度付近の粘度計測の原理

2.2 計測結果の事例

図2に固化温度 160℃のポリプロピレン (PP) の粘度計測の一例を示す。図中において、キャピラリーレオメーターを用いてせん断速度 200(1/s)で計測したものを青点(●)、考案した新手法によりせん断速度 2(1/s)で計測したデータを赤点(●)に示す。実線は、従来手法と新手法から得られたデータに対して、式(1)に示す Cross-WLF 式の7個の係数を最小二乗法でフィッティングして得た曲線である。射出成形 CAE には、この7個の係数を入力することで樹脂の粘度特性を反映させることができる。

このように、熔融樹脂を冷却すると固化に伴い固化温度近くで粘度が急激に増加する。一方、破線は従来手法のデータに限定してフィッティングして得た曲線である。破線は低温領域における粘度の増加がなく、固化温度付近の粘度を過小評価していることが分かる。

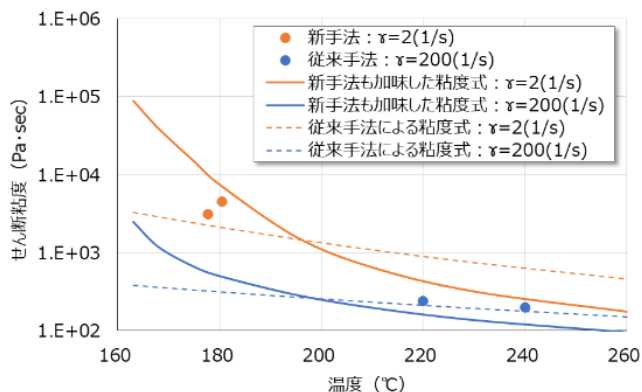


図2 計測事例 (計測対象: PP)

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau}\right)^{1-n}} \quad (1)$$

$$\eta_0 = D_1 \exp \left[\frac{-A_1 \{T - (D_2 + D_3 \times p)\}}{A_2 + T - (D_2 + D_3 \times p)} \right]$$

η : 粘度 (Pa·s)

$\dot{\gamma}$: せん断速度 (1/s)

T : 温度 (K)

p : 圧力 (Pa)

$n, \tau, D_1, D_2, D_3, A_1, A_2$: 係数

2.3 解析精度の向上効果の確認

本計測手法により得られる解析の精度向上効果を検証するため、成形と解析により充填状況を比較した。

図3は PP を材料とした射出成形品で、赤矢印はゲート位置を示す。この成形品は、リブの奥側はゲート側から 3mm、2mm、1mm の肉厚、その手前側の肉厚はゲート側 3mm から末端 0mm まで連続的に変化する形状を有し、必然的に、ショートショットが発生する。

解析には東レエンジニアリング D ソリューションズ製の 3D Timon を用いて計算し、そのフローパターンにより成形品と比較する。成形金型の寸法を基に、メッシュの品質確保のため肉厚 0.3mm 以下の部分を省いて、メッシュサイズ 1mm を目標にメッシュを作成した。解析モデルを作成した。3D Timon に搭載される樹脂データベースに収録された当該グレードの粘度特性を用いた解析結果を図4(a)に示す。流動の到達時間を色分布で示したものであり、緑色から赤色へ流れている様子を表している。流動が途中で止まるショートショットは予測できずに 0.3mm の板厚まで満充填される計算結果となった。

一方、本計測手法により求めた粘度特性を用いた解析結果は、図4(b)に示すとおり、実際の成形品に近い形状となった。解析モデルと解析条件は、粘度特性を除いて完全に同一である。両者の比較により、本計測手法による粘度特性を解析に反映させることで、成形品のショートショットをより正確に再現できることを確認した。

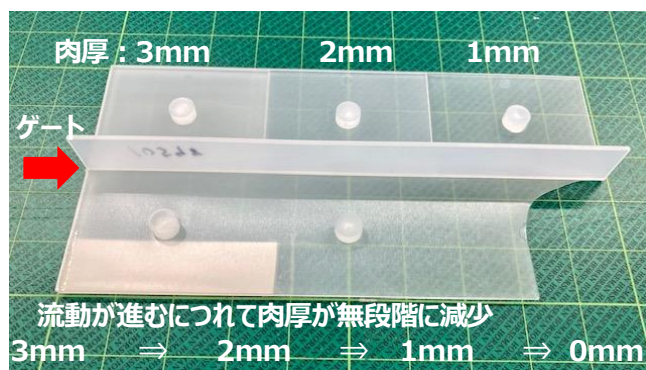


図3 成形品 (材料: PP)

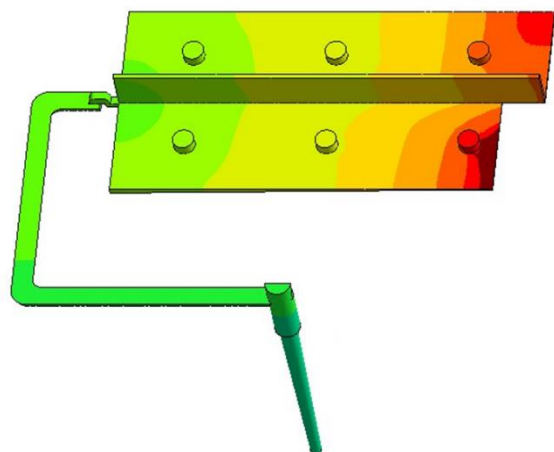
4 結 言

本研究により、溶融樹脂の固化温度付近の粘度計測を可能とする簡便な計測手法を開発し、その計測により次のことを明らかにした。

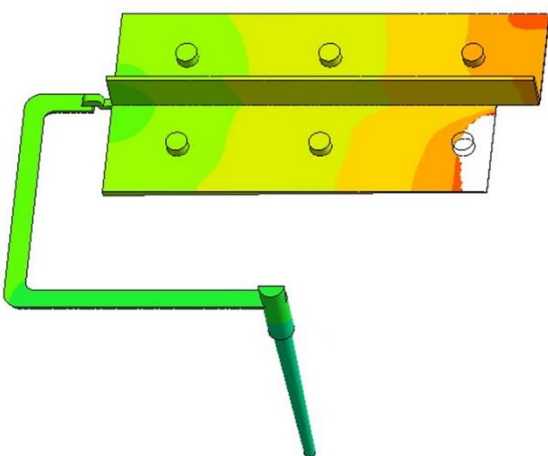
- (1) 溶融樹脂の冷却に伴い、固化温度付近では粘度が急激に高まる。
- (2) キャピラリーレオメーターを用いた成形温度付近の粘度計測データを基に粘度構成式をフィッティングする従来の手法では、固化温度付近の粘度を過小評価している。
- (3) 固化温度付近の粘度を反映した粘度特性を射出成形 CAE に適用することで、ショートショットの予測精度を向上することが可能である。

文 献

- 1) 田平他：広島県西部工技研究報告 51 (2008), 23
- 2) 田平他：広島県西部工技研究報告 53 (2010), 21
- 3) 田平他：広島県西部工技研究報告 56 (2013), 17



(a) データベース収録の粘度特性を用いた計算



(b) 本計測手法による粘度特性を用いた計算

図4 解析結果 (フローパターン)