

生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発

—樹脂流動解析シミュレーション技術に関する研究—

坂東 直行 平湯 秀和 山田 俊郎 久富 茂樹
 丹羽 厚至* 浅倉 秀一* 窪田 直樹*

A study on a Smart Injection Mold

- A Study on Simulation Technology of Injection Molding -

Naoyuki BANDO Hidekazu HIRAYU Toshio YAMADA Shigeki KUDOMI
 Atsunori NIWA* Syuichi ASAKURA* Naoki KUBOTA*

あらまし 炭素繊維をフィラーに含む熱可塑性樹脂の流動解析シミュレーションの妥当性を評価する目的で、実際に射出成形機によって成形加工した際の観測結果とシミュレーションの対比を行った。

ウェルドライン発生箇所とフィラー配向、圧力・温度変化、樹脂到達時間を評価項目として比較した結果、金型キャビティが流動樹脂で充填される様子や充填・保圧プロセスの過程で樹脂が冷めていく様子は概ね妥当であるが、ウェルドライン近傍のフィラー配向には差異が認められた。

キーワード 樹脂流動解析, 射出成形, 熱可塑性炭素繊維強化プラスチック

1. 緒言

近年、省エネルギー志向が高まり、金属材料で構成されていた機械部材を軽量のプラスチックに置き換える動きがある。

温めたシリンダ内で溶かした樹脂をピストンによって押し出し、金型に流し込んで固める射出成形は、得られる形状の自由度の高さからプラスチック成形加工で多用されている。部品を大量に製造するのに優れた加工技術であるが、強度特性を向上させるための強化材（フィラー）を含む材料を使う場合、安定した成形条件を見つけるのに手間がかかることが課題となっている。

この課題の解決には、流動解析技術の活用が有効と考えられる。流動解析とは、プラスチックを「溶かして、型に流し込み、固める」現象をコンピュータを用いて模擬（シミュレーション）する技術¹⁾である。この技術を活用すれば、設計段階の金型形状データで樹脂の流れを確認できるため、結果を設計にフィードバックさせることで成形条件を見つけるのが容易な金型の製作に繋がるものと期待されている。

この期待に応えるべく、流動解析は既にいくつかの商用コードが販売されている。しかし、現場での活用は限

られているのが現状である。これは、シミュレーションが比較的単純な法則や仮定の組み合わせで構成されるシステムであり、実際に取り扱いたい現象がこれら法則や仮定の範囲に収まるものであるか、各個の課題ごとに実験結果と対比しながら判断する必要がある。そのため、流動解析の実施は商用コードを利用することで比較的容易に済んだとしても、解析結果の妥当性の判断に更に労力を必要とするためと思われる。

そこで、本研究では、フィラーを含む樹脂の流動解析の結果が、現実の樹脂流動と比較して、どれほど妥当性を持っているかを判断する一助とするため、実験およびシミュレーションの対比を行ったので、以下に報告する。

2. 検証モデル

本研究では、射出成形における実際の樹脂流動とシミュレーション結果の比較を以下の検証モデルで評価した。

2.1 金型

本研究で用いる射出成形金型の形状を図1に示す。

この金型ではJIS K 7162で規定されているプラスチック引張試験片を2つ成形するものである。ランナー部には断面積を調整できる絞りを設けており流動パターンを変化させることができる。また、ランナーおよび試験片キャビティには温度センサおよび圧力センサを設置しており、実際の金型内部の樹脂流動を観測することができ

* 岐阜県産業技術センター

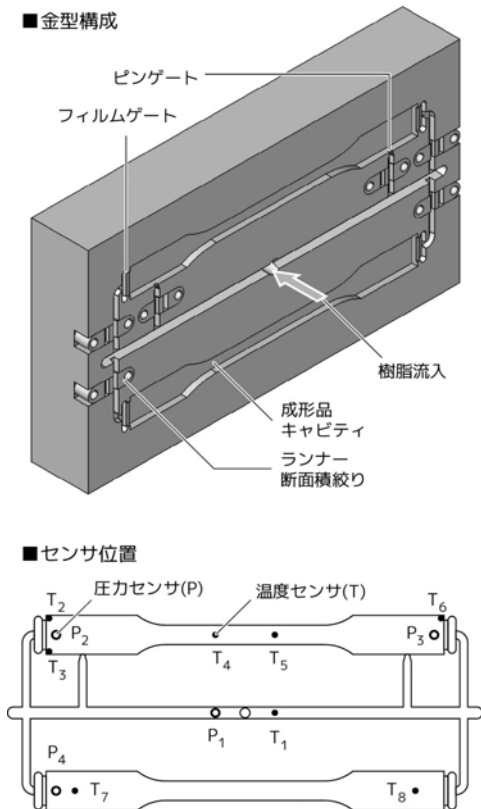


図1 射出成形金型

る。

2. 2 成形品形状

先の金型を用いて、本研究では図2に示す2つの形状を成形した。

パターン1はウェルドライン近傍での繊維配向を観察する目的の形状である。試験片の両端に設けられたフィルムゲートからそれぞれ樹脂が流入するパターンで、試験片中央部で流動先端が合流しウェルドラインが生じる。なお、2つの試験片のうち、一方の試験片の一端につながるランナーの途中で断面積を半分にする絞りを設けている。

パターン2は試験片キャビティおよびランナーに設けたセンサにより樹脂の到達時刻、圧力、温度を評価する目的の形状である。試験片の一方の端のみから樹脂が流入するパターンで、樹脂は試験片の長手方向に様に流れる。

2. 3 成形機

射出成形機には、住友重機械工業社製SE280HS-CIを用いた。この成形機は充填プロセス中、スクリュ速度を切り替える多段階射出機能を有している。また、動作はNC制御されており、射出圧力、スクリュ速度およびスクリュ位置をモニタすることができる。

2. 4 材料

射出成形材料には、Iupilon CFH2010を採用した。これ

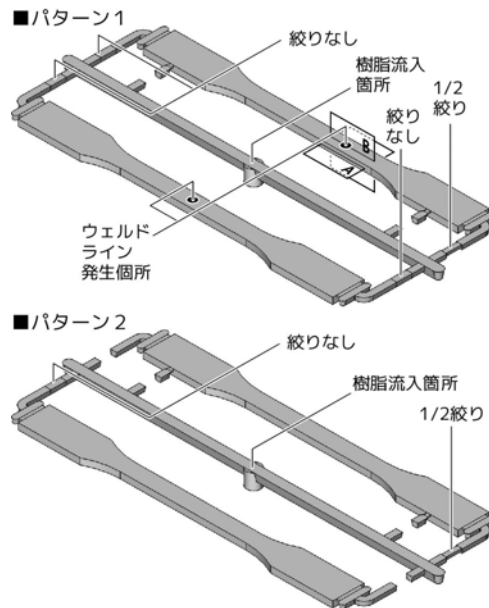


図2 成形品形状

は、ポリカーボネート樹脂にフィラーとして短炭素繊維を10%含んだ炭素繊維強化熱可塑性樹脂である。

3. 実験とシミュレーション

3. 1 実験条件

射出成形は主に充填、保圧および冷却プロセスからなる。このうち充填プロセスでは、スクリュを成形機限界まで前進させた位置を0mmとし、そこから85mm後進した位置を初期位置として、スクリュ位置64mmまでは速度70mm/sで前進、その後は速度20mm/sで前進する2段階速度切替方式を採用した。スクリュが前進して位置15mmに達すると保圧プロセスに切り替わる。本設定で充填プロセス時間は約2.75秒である。保圧プロセスでは10秒間50MPaの圧力で樹脂を押し続ける。保圧プロセスが終了すると圧力は解かれるが、そのままの状態を15秒維持して金型内で充填樹脂を冷却固化させる。その後金型が開き、成形品は取り出される。なお、本実験における射出樹脂温度は265℃、金型内部温度は90℃とした。

実験における射出成形設定および実際の成形機の応答を図3に示す。図において、横軸は時間を、縦軸はスクリュ速度および射出圧力を表し、実線は観測した値、破線は目標値を示す。なお、時間ゼロは樹脂の射出開始時刻である。また、充填プロセス中の射出圧力目標値は、装置を守るための限界設定値である。

図3から、設定したスクリュ速度に対し実際のスクリュ速度は正確に追従できていないことがわかる。これは、樹脂の流動抵抗など、移動を妨げる力がスクリュに働くためと考えられる。

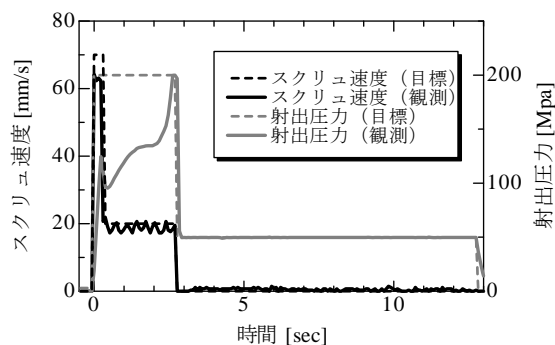


図3 射出成形設定および成形機の応答 (パターン2)

3. 2 シミュレーション条件

単位時間あたりに射出される樹脂量は、スクリュ速度にはほぼ比例する。図3で示したとおり実験時のスクリュ速度は目標値と実際の値が異なる。このため、スクリュ速度の目標値、つまり成形条件の値をシミュレーションでも採用すると、実際の流動挙動を正確に模擬できない。そこで、シミュレーションでは、実際のスクリュ速度を参照する方式で充填解析を行った。

シミュレーションはAutodesk社製Autodesk Simulation Moldflow Insight Premium 2014を用い、金型による冷却が非定常に行われることを考慮した充填および保圧プロセスを解析した。

4. 結果と考察

4. 1 樹脂流動現象の傾向評価

4. 1. 1 ウェルドライン

成形品形状パターン1を実際に成形した際とシミュレーションによって予測したウェルドラインの発生場所を図4に示す。実際とシミュレーションの結果がよく一致していることから、ウェルドラインの予測に流動解析は有効であるといえる。

4. 1. 2 フィラー配向

成形品形状パターン2を成形したときのウェルドライン近傍のフィラー配向について、実物の観察結果とシミュレーション結果を図5に示す。なお、実物写真はデジタル顕微鏡によって撮影したもので、配向を確認しやすいように画像処理によって炭素繊維をハイライト表示している。またシミュレーション結果では、フィラーがそろっている割合をトーンで、フィラーが最も揃っている方向を線で示している。観察面は、図2に示す試料の厚みを等分した平面（観察断面A）および幅を等分した平面（観察断面B）である。これは厚みおよび幅方向の中央部となる。

実物写真を見ると、この試料の場合、写真右方向から

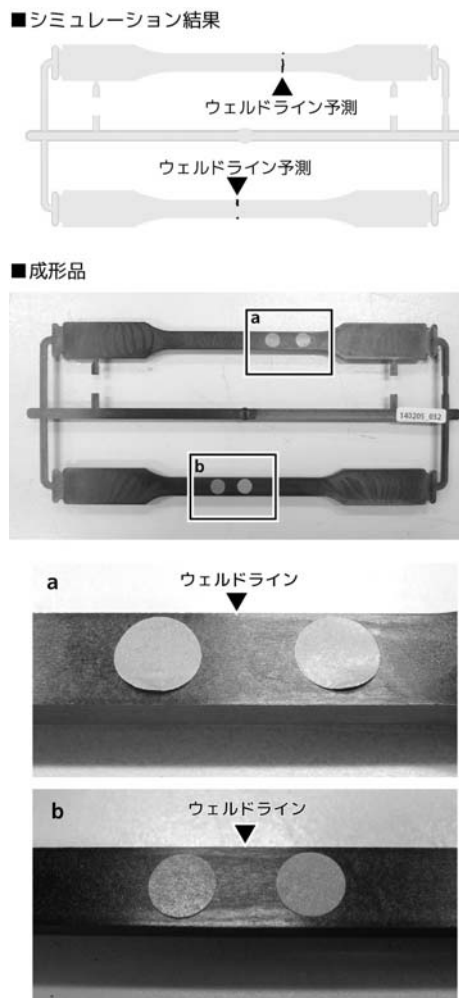


図4 ウェルドライン

流入した樹脂と左方向から流入した樹脂が合流したとき、右側樹脂は左側樹脂の中央部を進み、左側樹脂は右側樹脂の表面を伝うように進んだことが、フィラー配向からうかがえる。これは外気に触れて粘性を増した互いの流動先端が合流すると、圧力や粘度がわずかに高いほうが、一方の樹脂をかき分けるように進むためではないかと考えられる。

対してシミュレーションにおいても同様の傾向がみられるが、観察断面Bを比較すると、実際の配向ほどには顕著に一方の樹脂が他方の樹脂内部を進む様子は見られない。ここから、ウェルドラインにおけるフィラー配向の乱れは、概ねの傾向は一致するが、実際の複雑な合流の様子までは模擬することは難しいと推察される。

なお、試料の厚み方向を観察すると、合流する以前にあっても流動中心である厚み中央部において繊維が乱れている。これは既に知られている射出成形における繊維配向の知見^[2,3]と一致している。シミュレーションにおいても同様の結果を得られている。

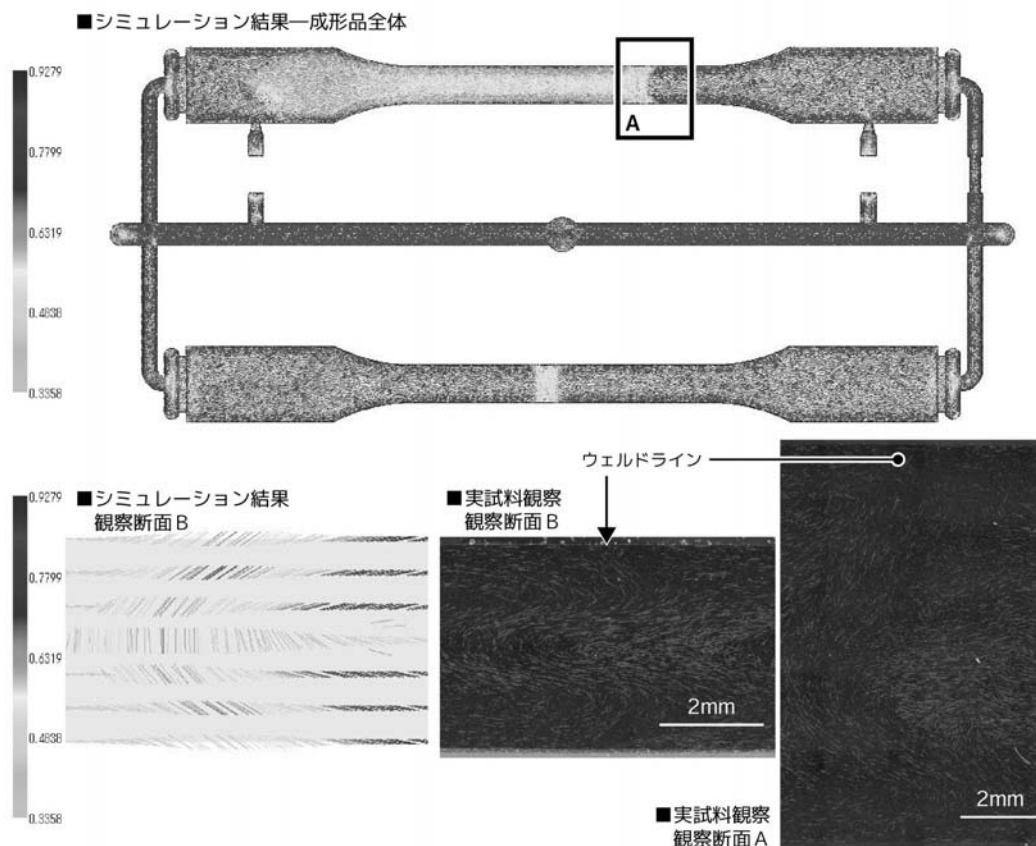


図5 ウェルドライン近傍のフィラー配向

4. 2 樹脂流動現象の計測評価

4. 2. 1 圧力・温度

射出成形時の実際の金型の圧力および温度の観測結果とシミュレーション結果を図6に示す。両図とも横軸は時間で、縦軸は圧力および温度を示している。なお、温度は図1に示す試験片を1つ成形する流路上にある T_1 から T_6 までを示している。また、実験における圧力は、金型内に設置した圧力センサの観測値であり、シミュレーションにおける圧力は、成形品が金型に対して垂直に作用した力を示している。

樹脂は、キャビティ内部を進み、空間を埋め尽くすと金型内の空間を押し広げようとする。その結果、金型内部のキャビティ表面の圧力は上昇する。よって、圧力センサの値がピークを示している時刻は、金型内部が樹脂で充填された時刻となる。本研究の成形実験では空間が充填されるとほぼ同時刻に保圧プロセスへ切り替わるので、ピーク値を示すのは一瞬で、その後金型内部では樹脂の冷却固化が進み、圧力は徐々に低下する。この様子をシミュレーションでもよく模擬できているが、圧力の絶対値には違いが見られる。

実際の流動樹脂は金型に触れた瞬間に固化するスキン層と呼ばれる膜内部を進む。金型に作用する圧力は樹脂の射出圧力を源とし、スキン層を介して金型に作用する。このとき、スキン層は、平面的に展開したシートに面

鉛直に力を加えたときのシートの反力のような力で、流動樹脂が金型を押し広げようとする力を阻害するものと考えられる。対してシミュレーションでは冷却に伴う固化層の増大で体積が収縮することによる圧力の低下は模擬するが、スキン層の平面的な復元力を考慮しないために、流動性を十分に有している状態で完充填した際は射出圧力とほぼ等しいピーク値を示し、全体では実験よりも大きな値を示すと考えられる。

金型内部の温度センサは、流動樹脂先端に触れても直ちには流動樹脂温度を観測せず、樹脂からセンサに熱が移動する僅かな時間を要する。この間に樹脂表面の温度は金型に熱を奪われて急激に低下するので、結果として温度センサの観測結果は、樹脂の射出時の温度より低い値でピークを有する山なりのグラフ形状となる。

この温度結果は実験とシミュレーションがよく一致しており、ピーク時の温度はほぼ違いがない。若干、保圧プロセス中の温度の低下傾向に違いがみられるが、これは金型素材の特性および熱伝達係数の設定が厳密でなかったためと思われる。

4. 2. 2 樹脂到達時間

図6の温度グラフにおいて、グラフが急激に立ち上がっている時刻は、流動樹脂先端がセンサ位置に達した時刻である。そこで、各センサに流動樹脂先端が至った時刻を温度グラフから読み取り、実験およびシミュレーショ

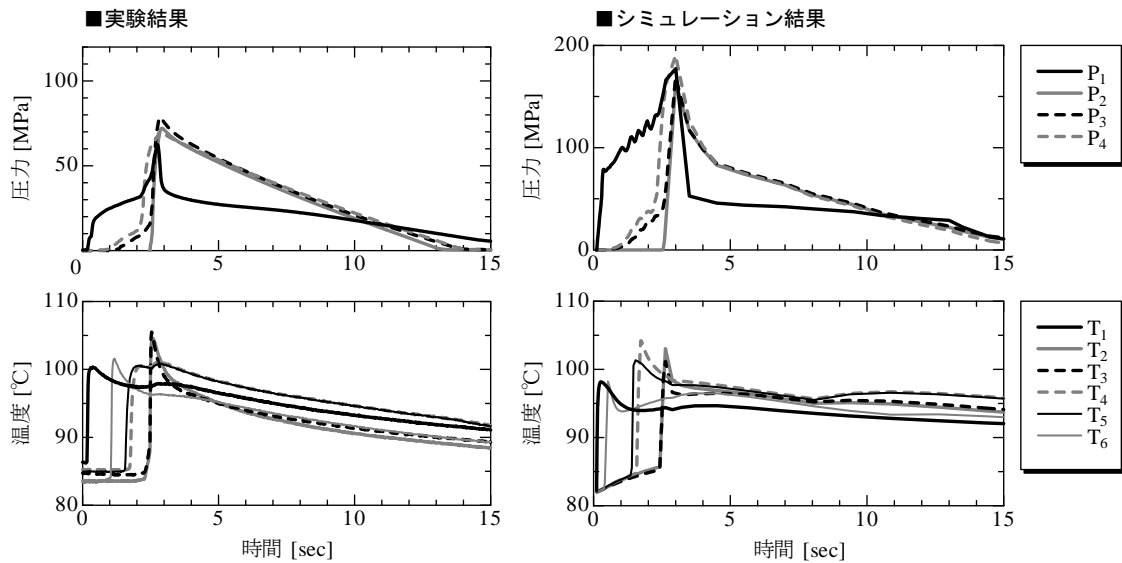


図6 圧力および温度の解析結果 (パターン2)

ンで比較したのが図7である。横軸には、流動樹脂が到達した順に温度センサを示し、縦軸には到達した時刻を示している。なお、時刻ゼロは温度センサT₁に流動樹脂先端が至った時刻としている。

比較すると、各センサに至る順序が一致していることから、樹脂が充填されていくパターンが一致していることがわかる。また充填時間間隔も数量的にはほぼ一致することがわかる。このことから、金型内で進展していく樹脂の流動を評価するのに、シミュレーションは有効な手段であるといえる。

5. 結言

フィラーを含む樹脂の流動解析の結果が、現実の樹脂流動と比較して、どれほど妥当性を持っているかを評価する目的で実験およびシミュレーションの対比を行った。

実験結果とシミュレーション結果はウェルドラインの発生箇所において一致した。フィラー配向は概ねの傾向は一致したが、実際の複雑な配向までは模擬することは

難しいと推察された。

圧力においては、経時変化は概ね一致したが、ピーク値に違いが見られた。これは、実際の成形では、スキン層が樹脂内部の圧力を金型に伝えることを阻害するためと思われる。温度はよく一致した。

温度観測結果とシミュレーションを用いて、樹脂の充填パターンを比較したところ、実験結果とシミュレーション結果には一致が見られた。

以上のことから、フィラーを含む樹脂の流動解析の結果は、金型キャビティが流動樹脂で充填される様子や充填・保圧プロセスの過程で樹脂が冷めていく様子は概ね妥当であるが、ウェルドライン近傍のフィラー配向については、結果の利用に注意を要するといえる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、株式会社岐阜多田精機 多田憲生 様には多大のご支援を賜りました。ここに感謝の意を表します。

文 献

- [1] 日本塑性加工学会, 流動解析 - プラスチック成形, 2004.
- [2] 竹田 啓, "射出成形における繊維配向", 繊維学会誌, Vol.47, No.2, pp.74-78, 1991.
- [3] 山下 勝久, 野々村 千里, 山田 敏郎, "射出成形品の繊維配向における層構造の解析(1)", 成形加工, Vol.13, No.6, pp.400-407, 2001.

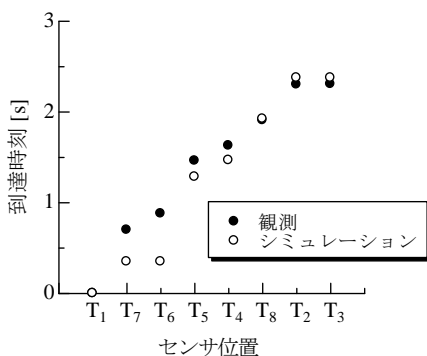


図7 センサへの樹脂到達時刻