パルプ射出成形の研究第3報 —肉厚変動領域における材料流動挙動の静的可視化解析—

松坂圭祐^{*1}・横井秀俊^{*2}

Study on Pulp Injection Molding (Part-3) —Static Visualization Analysis of Material Flow Behaviors in Thickness Change Area—

Matsuzaka, Keisuke^{*1}/Yokoi, Hidetoshi^{*2}

Pulp injection molding (hereafter PIM) is a new molding technology for realizing 3-dimensional molded products made of paper-based materials composed mainly of pulp and starch. It was developed with the purpose of reducing environmental impact. In this study, the authors proposed a new color-marking method which extracts, as flow history, information about the location on molded products of colored tracers initially positioned on the cavity surface, and built a flow model clarifying the material filling behavior using a rectangular cavity (1 mm thick) with an area varied in thickness (made up of rib and groove), intermediately positioned perpendicular to the flow.

(1) Flow behavior of area whose thickness can be increased (rib) :

- If the rib is thick, the tip of the flow which has dried up flows diagonally into the rib, and slides along the base of the rib. When the dried material gets caught at the exit of the rib, it temporarily stops flowing and spurts out from the rib to the downstream side of the rib until the inner pressure rises inside the rib cavity, resulting in a large delay in the flow of material. This causes the formation of a weldline-shaped convergence area on the downstream side.
- If the rib is thin, the tip of the flow enters the rib and reaches the base of the rib. After that, the material that follows generally does not enter the rib, and bypasses the base of the rib.

(2) Flow behavior of area whose thickness can be decreased (groove or hole) :

- With very thin walls of under 0.2 mm (groove), the material is unable to flow into the thin walls and detours to both sides of the thin-walled groove.
- In the case of obstacle plates (hole), as the material slides jetting from both sides of the obstacle plate, a large space is formed at the back of the plate. Subsequently this causes the material to fill into the space from both sides. When the space is finally filled and disappears, shear flow lines are generated along both sides of a stagnant triangular area at the back of the plate.

Key words : Pulp Injection Molding, Flow Behavior, Static Visualization, Thickness Change Cavity, Paper-based Material

1. 緒 言

パルプ射出成形（以下 PIM と略記）は、パルプと澱粉を主成分とした材料を射出成形し紙基材の3次元立体成形品を実現する新しい加工技術で、環境負荷低減を目的に開発された。パルプと結合剤（澱粉、ポリビニルアルコール（以下 PVA と略記））に水を加え混練したものを材料とし、射出・充填後に加熱された金型内部で乾燥させ形状を固定させる。以上の加工プロセスを経て、精密な立体構造物を得ることを特徴としている。また乾燥工程では、金型開閉

^{*1} 大宝工業㈱
Daiho Industrial Co., Ltd.
守口市大日町 1-3-7 (〒570-0003)
1-3-7 Dainichi-cho, Moriguchi-city, Osaka 570-0003, Japan
matsuzaka@daiho-hq.com

^{*2} 東京大学生産技術研究所 機械・生体系部門
Department of Mechanical and Biofunctional Systems, Institute of Industrial Science, the University of Tokyo
東京都目黒区駒場 4-6-1 (〒153-8505)
4-6-1 Komaba Meguro-ku, Tokyo 153-8505, Japan
2015.6.1 受理

動作を行い、乾燥の効率化を図っている。

PIM 成形材料は、結合剤である澱粉・PVA が射出シリンダ内部で 100℃ 前後に加熱後、金型内で再加熱される過程でパルプ繊維同士の摩擦を軽減させ、粘度低下を引き起こしながら流動する。一方、流動過程では乾燥が局所的な粘度上昇をもたらす。以上の成形過程は熱可塑性樹脂の成形過程と大きく異なるため、成形不良現象も材料由来の独自現象が多い。樹脂用の汎用流動解析手法は PIM には適用できず、PIM の適用を広げるために必須の流動予測技術の確立には、流動現象の解明とモデル化が必要となる。それと同時にそのための実験解析手法の開発が求められていた。

これまで、PIM 材料の流動特性を明らかにするため、バーフロー形状の流動性評価金型を新規に製作し、流動特性に与える金型温度、水分率、材料成分等の影響について評価実験を行った。さらに、特定の成形材料による基本特性を評価し、成形品内部構造の観察、環境湿度と機械的諸特性との相関解析、吸水性の評価実験をそれぞれ実施した¹⁾。また、パルプ繊維の長さや澱粉・PVA が PIM 成形品に及ぼす影響について、引張強さの評価と成形品内部に形成される空隙の形状、数量分布、空隙体積を定量評価することにより、それぞれ具体的に明らかにした²⁾。しかしながら、三次元的な流動挙動については、これまで解析が行われていなかった。

PIM では、特に局所的な肉厚変動領域（肉厚増加領域としてのリブ領域、肉厚減少領域としての部分薄肉領域）において材料流動形態が大幅に変化し、PIM 成形品にワレやウェルドライン等の不良発生が確認されている。こうした現象を解明するために、本研究では、まず金型内部の材料充填挙動の着色マーキング法による静的可視化手法を新たに提案する。また、同手法を用いて、流動途中に単純な肉厚変動領域を設けた矩形キャビティにより、成形不良現象の発生条件を系統的に調査し、材料充填挙動と成形不良現象との相関ならびにそれらの生成機構の解析を行った。

2. 実験方法

2.1 パルプ射出成形における着色マーキング可視化手法の提案

PIM 材料充填挙動を解明するために、これまでに①ショートショット法³⁾、②熱電対・圧力センサーの多点計測による流動挙動の推定手法¹⁾、③ガラスインサート金型を用いた動的可視化手法⁴⁾の適用が試みられてきた。しかし、以下の課題に直面していた。①ではフローフロント近傍の材料が内部の水蒸気により破裂・分断されるため、流動途中の形態を温存できず、充填パターンの抽出が困難であった。②はフローフロントがセンサーを通過する時間の情報しか得られず、詳細な流動挙動の解明には不十分であった。③では、キャビティ面から加熱する必要があるため、ガラスは側面部にしか設置できず、肉厚方向からの観察のみが可能である。これは板幅方向の材料の広がりや確認できないほか、流動中の PIM 材料が不透明なために成形品内部の材料流動についても観察できなかった。以上のことから、PIM 材料の充填挙動を解明するためには、金型内での充填挙動を詳細に可視化できる手法の開発が強く

求められていた。

PIM 材料の充填挙動は、熱可塑性樹脂における噴水流れではなく、滑り流動が支配的であることが、上記③の可視化金型による肉厚方向観察結果によりすでに明らかになっていた⁴⁾。滑り流動では、金型壁面の一部に加熱により固まらないマーカーを塗布した場合に、当該場所を開始点として下流側方向へと同マーカーが引き伸ばされることが期待される。この考え方を検証するために、矩形キャビティ（50×200×1[mm]）でゲートから約 50 mm 離れた位置にマーカーを塗布し、その流動軌跡を観察した。図 1 に成形品の外観を示す。マーカーは、塗布位置から下流側へとほぼ直線的な筋を描いて残留していた。これより、材料通過時から充填終了まで、一度成形品表面を濡らしたマーカーは、流動過程を通して成形品表面で引き伸ばされていくことが確認され、PIM 材料が噴水流れではなく滑り流動の形態を保持しつつ充填することが検証された。逆に、この現象を利用することにより、成形品に残留するマーカー軌跡をトレースする静的な可視化手法として、充填過程の材料挙動を簡便に調査できる可能性が示された。図 2 (a) に材料流動が大きく変化する厚さ変動領域での、表面部の材料流動挙動を示す。リブ部表面の上流側にマーカーが現れていることが理解され、リブ後方でマーカーが乱れている様子が確認された。また、図 2 (b) に図 2 (a) リブ内部のマーカーを X 線 CT により抽出し、3 次元で表示した事例を示す。マーカーに金属粉末（例えば、アルミ粉末等）を分散させることで X 線 CT により容易にマーカー領域を抽出でき、非破壊で成形品内部のマーカー軌跡が観察可能となる。表面近傍を流れる材料が成形品の内部にどのように侵入するかについて、マーカーの軌跡を読み取ることで内部の流動挙動が解明できるものと期待される。

Fig.1 Example of marker extension pattern dragged from the original point during the cavity filling process

Fig.2 Observation of marker's trace pattern in rib-shaped sample containing metal powders

以上より、滑り流動が支配的なPIM材料の充填現象の解明には、新たに提案する着色マーキングの可視化法の有用性が実証的に示唆された。着色マーキング可視化手法は、自由なパターンでマーキングできる特長がある。以下の成形実験での適用においては、広範囲で材料充填挙動を解析する目的で帯状にマーキングする方法と、キャビティ内の一点を通過する材料がその後どのように流れるかに注目し点状にマーキングする方法、の2つの方法を用いることとする。前者をラインマーキング法、後者をポイントマーキング法と呼称する。ラインマーキング法は、キャビティ幅全域を横断するように帯状にマーカーを塗布する方法である。これによりキャビティ全域に亘る全体的な材料充填挙動が確認でき、ウェルドラインの予測や材料流動の遅延現象の確認を行うことが可能である。一方、ポイントマーキング法は、大きさ $\phi 3\sim 5$ mm程度の点状にマーカーを塗布する方法で、その領域上を通過した材料のみに注目して充填挙動を解析することが可能となる。障害物近傍の迂回流動や肉厚変動領域などでの潜り込み流動現象解析への適用が考えられ、不良現象の予測や解析に有用であるものと期待される。

2.2 成形条件と実験測定方法

使用した成形材料は、針葉樹パルプを60 wt%，澱粉を30 wt%，PVAを10 wt%の割合で配合したものに、水を加えて重量水分率35 wt%に調整した材料とし、スクリュ径 $\phi 56$ mmのPIM専用射出成形機NEX 220-50 EPI（日精樹脂工業株）により成形を行った。成形条件を表1に示す。乾燥工程での型開閉動作は10回とした。図3にキャビティ形状を示す。キャビティは、 $50\times 200\times 1$ [mm]の矩形形状で、ダイレクトゲートを使用している。キャビティの可動側において、局所的な肉厚増加領域（リブA'）をゲートから191 mmの位置に、また局所的な肉厚減少領域（溝B'）を122 mmの位置に、いずれも流動方向に直交するように配置した。局所肉厚変動領域の寸法は、リブ・溝ともに長さは18 mm一定として、図4の高さI、厚さIIのリブ形状、深さIII、幅IVの溝形状を表2のように変化させて、その影響を評価した。なお、着色マーキング法によるマーカー金属粉の分布計測には、X線CT装置SMX-130 CT（株島津製作所）を使用した。

Table 1 Molding conditions

Cylinder temp.(°C)	(Nozzle) 90/80/65 (Hopper)
Mold temp.(°C)	180
Injection rate(cm ³ /s)	24.6

Fig. 3 Cavity shape

3. 局所肉厚増加領域 A における流動挙動

3.1 ラインマーキング方法と実験条件

実験領域Aは、肉厚増加領域と肉厚変動がない領域を通過する材料に対し、同時に観察する必要があるため、ここではラインマーキング法を使用した。図4(a)に示すように、アルミ粉末入り油性マーカーのペイントマーカーPX-30（三菱鉛筆株）を用いて、リブA'の20 mm上流側に、金型可動側キャビティの幅方向に横断するように約10 mm幅の帯状に塗布した。リブA'の寸法は、リブ高さ1.0 mm、厚さ1.0 mmを基準として、高さ0.5, 1.0, 2, 0 [mm]と厚さ1.0, 2.0, 3.0, 4.0 [mm]の中から、表2の6通りの組み合わせ形状を用いて、材料流動挙動を調査した。

3.2 リブ領域の流動挙動

X線CTにより抽出したリブ内部のマーカー軌跡（白色部）を図5に比較して示す。リブ厚さを一定にしてリブ高さを変化させた(a)～(c)では、マーカーがリブ高さ方向にせり出すように迂回しつつ、リブの根元を横断する様子が観察された。また、その迂回する深さはリブ高さに依存せず概ね一定の値を示した。一方リブ高さを一定にして、リブ厚さを変化させた(b)および(d)～(f)では、(b)でリブ先端まではマーカーが到達していないものの、リブ厚さが増大するに従って、マーカー軌跡はリブ内部へと深く進入し、厚さ3 mmの(e)では、マーカー軌跡がリブ先端部ま

Table 2 Dimension of rib and obstacle plate

(a) Rib			(b) Obstacle plate					
No.	I	II	No.	III	IV	No.	III	IV
1	0.5	1.0	7	0.5	2.0	13	0.6	4.0
2	1.0	1.0	8	0.6	2.0	14	0.6	8.0
3	2.0	1.0	9	0.7	2.0	(mm)		
4	1.0	2.0	10	0.8	2.0			
5	1.0	3.0	11	0.9	2.0			
6	1.0	4.0	12	1.0	2.0

Fig. 4 Position of marked zone or point and the dimension of local thickness-change area for each experiment area

Fig. 5 Comparison of marker's trace patterns in X-ray CT images under different configurations of rib

で露出している。さらに厚さ 4 mm の (f) では、リブ先端部でのマーカー軌跡の露出面積が広がる傾向が示され、そのリブ先端の下流側角部 y では、マーカーが表層部に露出せずに内部を横断しつつ板面部へと回帰する様子が確認された。また上記の材料流動に沿って扁平化した空隙が形成され、 y とマーカーとの界面に沿ってはやや大きな空隙が残留する様子も観察される。成形後のリブ裏面には、(e) と (f) でいずれもノッチ状の窪みが残留している。これは PIM 材料が傾斜してリブ内部に膨張しつつ流入する流動履歴とリブ内部から板面部へと回帰する流動履歴との境界に形成されることから、二つの流れの境界に出来る皺状の欠陥と推察される。なおリブ部流入側の角部には z で示される未充填部が形成される。同領域は、流動過程では表層材料の乾燥が進む一方で、流入直後の材料が滑り流動し続け、リブに流入した材料が板面部に回帰する時の流動抵抗が小さいため、完全にリブ角部を充填することはない。また流動停止後には、流入時よりさらに材料の乾燥が進み、且つ流動過程の圧力分布の影響を受け z 部へ進展するための内部圧力上昇が不足し、結果として未充填のまま取り残されるものと考えられた。

リブ A' の寸法の違いによる成形品について、ラインマーキングを施した後の成形品（リブ側）の外観を図 6 に比較して示す。同図の各写真中央の縦筋は、X 線 CT 観察時の

Fig. 6 Comparison of top-view appearances of molded samples with different rib configurations

切断線である。(a)～(c)のリブ部下流領域では、リブの両側を流れて来た材料とリブ部を通過してきた材料との境界は観察されるものの、いずれもリブ下流領域の成形品表面にはマーカーが一様に分布する様子が確認された。一方 (d)～(f) では、リブ部下流領域でマーカー着色パターンが大きく乱れ、またその領域がリブ両側を流れるパターンと比較して大きく遅延している。リブ厚さが増大すると、リブ両側のマーカーパターンがリブ下流側へとやや傾斜して流入し始め、また遅延現象がさらに顕著となっている。リブ両側からの傾斜流入は、リブ厚さの増大がリブ領域に流入する材料の分流効果を高め、一時的な材料不足をもたらすためと考えられた。一方、マーカーパターン遅延現象の下流側には、無着色材料領域が大きく広がっている。これは、リブ厚さが大きいリブ内部では、図 5 の (e), (f) で観察されたように、マーカー付着面近傍の材料がリブ内部の縮小領域にトラップされるため、それまでの表層面滑り流動から内層部の層流へと流動形態が遷移し、結果としてリブ部下流域では内層部側の無着色材料が先行して流動したものと推察された。

3.3 局所肉厚増加領域の流動モデル

以上の結果より推定されたマーカー付着過程のモデルを図 7 に、リブ A' 内部でのマーカー軌跡の生成モデルを図 8 に示す。金型表面に塗布したマーカーの上を PIM 材料が通過しようとする。その際、フロント領域では界面からの気化により材料の乾燥が進行し、厚い滞留領域を形成しつつ流動する。これにより金型壁面から浮き上がるか、あるいは接触圧が小さい領域が広がり、マーカーが付着しにく

Fig. 7 Extension process model of the marker painted on the cavity surface during the filling process

Fig. 8 Flow model inside rib cavity

くなっている。その後、流動先端が通過して内圧が上昇し接触圧が大きくなってはじめてマーカーが表層面に付着すると考えられた。リブ部の拡大流領域に差し掛かると、上記流動先端の滞留・乾燥材料が、リブ側へと倒れこむように傾斜流入を開始する。それに続くリブ内部から板面部に戻る縮小領域では、傾斜した流動先端がリブの出口部に引っ掛かり、流動先端の形状が変化する。流入時の傾斜角が大きい場合は形状変化も大きくなる傾向が示唆された。リブ部における材料の充填モードは、大別して以下の2通りの流動形態に分類されたと考えられた。①拡大流モード；A'の幅Ⅱが大きい場合、A'に傾斜流入した流動先端が出口で引っ掛かり、リブ内部が材料で充填され内圧が上昇するまで、材料がリブから下流側へと流出しない。材料が再流動を開始し始めると、リブ先端角部に最初に流入した未着色材料が取り残され、その内層側を、後から来たマーカー付着材料が通過して行く(図8(a))。②通過流モード；A'の幅Ⅱが小さい場合、マーカーが付着していない材料が先にA'に侵入して充填した後は、後から続くマーカー付着材料が、流動先端材料と分断しつつA'底面を横断し、リブ内部にはほとんど侵入することなく通過して行く(図8(b))。

4. 局所肉厚減少領域 B における流動挙動

4.1 ポイントマーキング方法と実験条件

実験領域 B ではウェルドラインの生成とキャビティ幅方向の材料流動を確認するため局所的に肉厚を減少させていき、貫通穴状態まで変化させた。ここではウェルドライン生成を詳細に観察するためポイントマーキング法を使用して材料流動挙動の解析を行うこととした。まず、溝 B' の 30 mm 上流側の図 4(b) M1 に約 $\phi 3$ mm のマーカーを塗布し、ウェルドラインが生成し始める溝深さの閾値を調査する。なお塗布面は可動側キャビティ表面のみとした。溝 B' の寸法は深さ 0.5 mm、幅 2 mm を基準とし、深さを 0.1 mm 刻みで 1.0 mm (貫通穴状態) まで変化させ、また幅 2.0, 4.0, 8.0 (mm) との表 2(b) の 8 通りの組み合わせ形状を用いて、材料流動挙動を調査した。次に、貫通穴状態の B' (以下、穴 B') が周辺部の材料流動挙動に及ぼす影響を調査するため、穴 B' の上流側 20 mm の領域に、

キャビティ幅中央から側面方向に向かって 0, 4, 9, 14.5, 21.5 mm 離れた位置に約 $\phi 5$ mm のマーカーを塗布し、各位置のマーカー軌跡を観察した。

4.2 溝領域の流動挙動

ポイントマーキング法を使用して、溝 B' の寸法を変化させた成形品の状態を図 9 に示す。幅 2.0 mm の溝 B' では、No. 7~9 の溝深さ 0.5~0.7 mm までは着色材が B' を通過するものの、溝が深いほど B' 手前側でのマーカー幅が広がり始め、B' 通過後のマーキング軌跡の長さも減少を示した。No. 10 の深さ 0.8 mm 以上では着色材が B' の両側から迂回する。これより 0.7~0.8 mm 間に、迂回する溝深さの閾値があることが示唆された。また、No. 10~No. 12 の迂回流れ条件でのマーキング軌跡は、溝 B' で二手に分かれた後に、溝下流側では中央方向に若干回帰するものの再会合はせず、そのまま流動末端方向へと延伸する様子が確認された。次に、深さを 0.6 mm に固定して幅 4.0 mm, 8.0 mm と大きくした No. 13, 14 では、迂回流れは確認されなかったが、No. 14 では No. 9 と同様にマーカーが溝 B' で大きく左右に広がり、マーカー軌跡長さが減少した。未実施ながら、さらに溝幅を増大させると迂回流れが発生するものと予想される。

貫通穴 (No. 12) での流動過程をより詳細に観察するために、マーカー塗布位置を板幅中央から側面部に向かって順次移動させ、B' 周辺部のマーカー軌跡を観察した。マーカー位置 M2 からのマーカー軌跡を図 10(a)、マーカー濃淡の 3 値化処理画像を図 10(b) に示す。穴 B' の手前に白い円弧状の滞留部が形成され、その滞留部の外側を M2 からの着色材料が分岐して流れている。これは、図 7 で示したように、マーカーに接触しなかった流動先端部の白色材料が最初に B' と接触して残留したものと理解された。一方、B' 後方の中央領域 (ウェルドライン形成領域) にも白い滞留域が広く残留しており M2 のマーカーが同領域には到達しないことが明らかとなった。つぎに M3~M6 の着色材料について流動軌跡の画像処理結果を図 11(a) に比較して示す。M2 とは異なり、M3, M4 では B' 後方のウェルドラインの直近にまで着色材料が流入している様子が確認された。また、M4 の A 部に特徴的な形状を持った白

Fig. 9 Comparison of the pigment trace patterns of point-painted marker in different obstacle plates (No. 7 - No. 14)

色部が形成されている。これはM2でのB'両端部から下流側へと迂回するマーカーの軌跡と類似しており、M4の材料が流入後にM2の材料が遅延してゆっくりと流入した痕跡と理解された。

以上のM2～M6までのマーカー軌跡を重ねあわせて、板面部を流れる材料がB'を迂回して後方へ流動する全体の流動パターンを、図11(b)に一括してまとめた。各点のマーカー延伸長さを比較すると、中央部のM2、M3より側面側のM5、M6の方が、長いことが確認される。これは、B'の障害板により材料流動が妨げられたことが要因と

Fig. 10 Appearance and image-processed result of pigment trace pattern dragged from M2

Fig. 11 Image-processed results of the pigment trace pattern dragged from each marked point and their overlapped image (obstacle plate No. 12)

して考えられるほか、B'により滑り流動挙動が抑制され、内部の材料が優先的に流れる噴水流動挙動に、移行した可能性が考えられた。これを裏付けるように、流動末端部では中央部ほど着色されていない領域が広がっており、三角形の無着色部Cが形成されている。

また、X線CTにより抽出した溝領域の上流・下流における肉厚方向断面のマーカー軌跡（白色部）を、図12に示す。上流側の図12(a)では、マーカーから溝領域に向かって表層部から中央部に向かって傾斜している様子が確認された。これは、先行する無着色材料の界面で肉厚中央部へ潜り込み、その後材料は板幅方向へ分岐したと推察された。下流側の図12(b)では界面が流動方向と並行であるが、(a)と同様の図を示した。これは、ウェルドライン形成時にどちらが上になるかは、ショット毎に変化するため、必ずしも発生する現象ではないと考えられた。

4.3 矩形穴部近傍の流動モデル

矩形穴B'近傍における、板幅方向の流動モデルを図13に、肉厚方向の流動モデルを図14に、それぞれ示す。PIMでは主に滑り流動により材料が充填されるため、流動初期では、板面部での流動抵抗が小さいことを反映して、図13(a)のようにジェット状に直進しつつ流動する。矩形穴B'に流動先端が到達すると、分岐流動が開始し障害板となるB'に接触しない材料は先行直進し、中央の未充填領域にも拡大流入するため、B'の後方には一時的に三角形の空洞が形成される。さらに充填が進行すると、流動材料の内部圧力が、上昇することから、(c)のように空洞を押し潰すように両側からの滑り流動により充填され、中央部にて会合してウェルドラインが形成される。その後、(d)のようにB'上流中央部を流れていた材料が遅延して流入してくるが、中央部はすでに充填済みであるため、充填済み材料との境界面をせん断流れすることによって、B'下流側に残り残された領域を形成したと考えられた。また肉厚方向では、流動先端の乾燥した無着色の材料が、B'に接触し、後から来る着色した未乾燥で流動可能な材料に圧縮され変形する。このときに金型壁面へ押し付けられた乾燥した無着色材料は、変形が抑制され、さらに圧縮により材料密度が上昇するため、形状固定が進行する。以上の理由から、材料の流動が制限されB'の上流側に留まると考えられた。後から来る着色された未乾燥材料は、固定された材料を避けるように流動するため、図14(c)のように内部

Fig. 12 Marker's trace patterns around the obstacle plates and their cross-sectional images observed by X-ray CT (obstacle plate No. 12)

Fig. 13 Schematic model of material flow around the obstacle plate

Fig. 14 Schematic model of Cross-sectional material flow just before the obstacle plate

方向へ進入した後、板幅方向に分岐したものと推察された。この現象は、分岐後再会合部でも同様に発生している（図 12(b)）。この場合は、先に進入した M4 の材料が金型壁面によって固定されるため、後から来る M3 の位置の材料が内部方向に進入しながら界面を形成しているものと理解された。

5. 結 言

本研究では、主に滑り流動により充填がなされる PIM の特徴に着目して、キャビティ表面に配置した着色材の軌跡を流動履歴として抽出する着色マーキング法を新たに提案し、滑りを主体とした PIM 充填挙動に最も大きな影響を与えるキャビティ面の凹凸領域について、その 3 次元的な流動現象を明らかにした。すなわち、矩形キャビティ（厚

さ 1 mm）の途中に、流動に直交配置させた単純な肉厚変動領域（リブ高さ 0.5~2 mm および溝深さ 0.5~1 mm）を設け、着色パターンと X 線 CT 画像により材料充填挙動の解析ならびに流動のモデル化を行った。

(1) 肉厚増加（リブ）領域の流動挙動；

① リブ厚さ 3 mm 以上の場合、乾燥が進んだ流動先端がリブに傾斜流入し、リブ底面に沿って滑り流動する。その後リブ出口で引っ掛かると、材料がリブを充填し内圧が上昇するまでリブ下流側へと湧き出ず、大きな遅延を形成する。同時に、板面部ではリブ両側の材料が先行するため、特にリブ厚さ 4 mm 以上ではリブ下流にウェルドライン状の会合部を形成する。

② リブ厚さ 2 mm 以下の場合、流動先端がリブに侵入してリブ底面まで到達する。その後は、後続材料がリブ内部にほとんど侵入することなく、リブ根元部を横断するように通過する。

(2) 肉厚減少（溝あるいは穴）領域の流動挙動；

① 溝幅 2 mm 一定では、溝深さ 0.8 mm 以上で薄肉溝部を避けて両側に迂回する流れを形成する。迂回流れを形成しない溝深さ 0.4 mm でも、溝幅 8.0 mm 以上では薄肉部の滑り抵抗が増加し、迂回流れに遷移する可能性が示唆された。

② 溝深さ 1.0 mm（穴）の後方では、溝部を避けて PIM 材料がジェット状に滑り流動するため、障害板の後ろ側に回り込めず、一時的に大きな空洞を形成しつつその下流側にはウェルドラインを形成する。その後、空洞部の両側から空洞を挟むように、滑り流動により充填が進み、空洞消失後は障害板後方の三角形領域を取り残す形で、その両辺に沿ってせん断流れを形成する。

パルプ射出成形品では、設計時に安易なリブ設置による強度改善や、貫通穴等の機能付与には大いに注意を払わねばならない。本研究成果より、リブ幅/高さの比が 2 以上の場合リブが根本折れし難いと考えられ、2 未満の場合は事前に材料の流動をよく検証する必要がある。また穴等が必要な場合では、現状後処理で打ち抜き加工をしているが、穴後方に影響が出にくい 0.3 mm 程度の肉盗みを行うと打ち抜き機の刃の更新時期が延長されることが期待される。

参 考 文 献

- 1) 横井秀俊, 松坂圭祐: 成形加工, **22**(11), 645 (2010)
- 2) 松坂圭祐, 横井秀俊: 成形加工, **24**(12), 712 (2012)
- 3) Hieber, C. A., Socha, L. S., Shen, S. F., Wang, K. K. and Isayev, A. I.: *Plym. Eng. Sci.*, **23**, 20 (1983)
- 4) 横井秀俊, 山脇靖広, 増田範通, 成形加工'08, 83, 2008