

論文内容の要旨

論文題目 射出成形可塑化過程の可視化実験解析

氏名 龍野 道宏

射出成形は最も代表的なプラスチックの成形加工法である。この射出成形は、プラスチックの可塑化、金型内への射出、金型内での冷却・固化の各過程から構成されている。ここで最初の可塑化過程は最終製品に大きく影響し、高品質の製品を生産するためには樹脂の均一な熔融状態を得ることが重要である。さらに、生産性向上のためには、断熱材に近い特性を持つプラスチックを短時間に加熱・熔融させることが必要である。そのため、射出成形機には加熱シリンダとスクリュによる可塑化機構が使用されている。

この加熱シリンダ内の可塑化過程は、同様の機構を採用している押出成形機において、定常的な可塑化中の樹脂状態を急冷・凍結して引抜く方法により解析されてきた。これにより、スクリュ溝内では熔融樹脂のメルトプールと未熔融樹脂の集合体であるソリッドベッド(以下 SB と略記する)とが混在することなどが明らかとされ、固体輸送、熔融、熔融体輸送の各ゾーンに分割して理論化に至っている。しかし、熔融過程において SB が時に分裂するブレイクアップ(以下 BUP と略記する)現象などの可塑化過程の不安定現象については、定常的可塑化モデルから逸脱しており、その生成機構の解明が課題となっている。

また、射出成形においては、可塑化は断続的に、かつスクリュの前後進を伴って行われるため、定常的な安定状態を得ることができず、材料の噛み込み不良、樹脂輸送の停滞、BUP 現象などの可塑化不安定現象が頻繁に発生している。しかし、従来のスクリュ引抜きによる静的な可視化手法では、このような過渡的非定常現象そのものを具体的に捉えることは困難であった。そのため、射出成形における可塑化現象自体の解明は著しく遅れていた。

そこで本論文では、加熱シリンダ内可塑化過程の過渡的非定常現象を動的に可視化定量解析する手法を確立し、SB の BUP 現象、及び射出成形における計量可塑化過程での各種現象の生成機構を解明し、実用的なモデルを提示することを研究目的とした。

本論文は序論と総括を含めて 2 部、全 8 章より構成されている。

第 1 章序論では、スクリュ可塑化現象に関する従来研究の概要と問題点について分析し、本研究の目的を述べた。

第 I 部は、SB の BUP 現象の解明を課題としている。第 2 章ではガラス内挿方式可視化加熱シリンダによる動的可視化手法、及び冷却管路付き加熱シリンダ・スクリュによる静的可視化手法を併用した解析手法を確立し、同手法により結晶性樹脂のポリプロピレン、ポリアミド、及び非晶性樹脂の汎用ポリスチレンの 3 種類の樹脂について連続可塑化過程における BUP 生成過程を解析した。これにより、従来の提示されていた BUP 生成モデル、すなわち、熔融の進行した SB が熔融樹脂流動に引伸ばされ破れが生成するモデル、及び圧縮部において Maddock-Tadmor 型の SB が圧壊する生成モデルの 2 つのモデルを検証した。その結果、引伸ばし型モデルについては、その妥当性を確認した。また、圧壊型のモデルについては、圧縮部における SB とスクリュ・シリンダ壁面との干渉を起点として、浅底化に沿うスクリュ表面速度上昇及び SB と壁面との間のせん断速度増加に起因して、干渉域の SB 内に大きな引張力を生成することにより、SB に破れを生成したものと推察して、さらに一般化した生成モデルとして提示した。

第 3 章では BUP 現象に対するスクリュ形状の影響を解析した。前章で用いた標準的なゾーン配分のスクリュに対して、供給部長さを延長し、その分圧縮部を短縮した急圧縮スクリュによるポリプロピレンとポリアミドの連続可塑化過程における BUP 生成現象を解析した。その結果、ポリプロピレン可塑化過程での BUP 現象は、前章までに提示した 2 つのモデルにより記述できることを明らかにした。一方、ポリアミドの場合は、急圧縮スクリュにおける長い供給部において特徴的な BUP 現象が生成することを明らかにした。これは、供給部で Maddock-Tadmor 型から侵入型へと可塑化モデルが変化する領域

で、侵入型の SB が熔融層圧力によりシリンダ壁面へと強く押上げられ、SB とシリンダ壁面間でのせん断力増加に起因して、SB 内に大きな引張り力が生成することにより、BUP が生成したものと推察して、新たな生成モデルを提示した。これにより、BUP 現象は、一連のスクリュ溝内での可塑化モデルの変遷過程における SB とスクリュ・シリンダ壁面との干渉状況に対応した 3 つの生成モデルに集約された。すなわち、[I] Dekker-Lindt 型可塑化モデルの SB が熔融樹脂流動により引伸ばされ破断する、[II] Maddock-Tadmor 型または Shapiro 型の SB がスクリュ圧縮部でシリンダ・スクリュ壁面と干渉し、浅底化に沿うスクリュ表面速度上昇及び SB とスクリュ・シリンダ壁面との間のせん断速度増加に起因して分離する、[III] 侵入型の SB がスクリュ側熔融層に押上げられ、シリンダ壁面間のせん断力増加により破断する、という 3 つのモデルを提示した。

第 II 部では、射出成形における計量可塑化過程の解明を課題としている。第 4 章ではガラス内挿方式可視化加熱シリンダとスクリュ追従撮影装置による可視化定量解析手法を開発し、ポリプロピレン計量可塑化過程の解析を通じて、その有効性を確認した。ここでは、スクリュ表面上の固定位置における計量可塑化過程を擬似展開画像で具体的に表示すると共に、所定の観察位置における SB 幅を計測し、スクリュ溝幅の比である SB 比の時間変化を算出した。これにより、圧縮部溝内において、計量開始から徐々に SB が増加した後、計量後半で SB の細かな BUP を伴う部分的な熔融進行領域が生成し、その後熔融の遅れた SB が出現して計量完了に至る過程を具体的に明らかにした。また、各種成形条件を変更し、それらの計量可塑化過程への影響を SB 比により定量的に示した。さらに、上記の部分的熔融進行現象が成形条件変更時にも生成することを明らかにした。

第 5 章では、供給部溝深さ及び供給部と圧縮部の長さ配分を変更した 4 種類のスクリュによるポリプロピレン計量可塑化過程の可視化解析を実施し、スクリュごとの可塑化現象を具体的に明らかにした。これにより、供給部溝深さの影響として、浅溝ではスクリュ中間部において SB が細かく分裂するのに対し、深溝では SB の連続性が保たれることを明らかにした。これは、溝深さが浅いほど SB 熔融が早期に進行すること、及び供給部で浅溝ではペレット間に隙間を持った凝集力の小さい SB が形成されるのに対し、深溝ではペレットが 3 次元的に配置した強く凝集された SB が形成されるためと推察した。また、供給部長さの影響は、同一観察位置において標準スクリュの圧縮部よりも供給部が長いスクリュの供給部の方が、計量前半の SB 比が大きいことを明らかにした。これは、圧縮部では薄く幅広の SB の熔融が効率よく進行するのに対して、供給部ではスク

リユ溝深さに対応した厚く幅の狭い SB の熔融が遅れるためと推察した。さらに、各種スクリュにおいて、計量開始時の熔融樹脂が含浸した低輝度領域がホッパー側の観察位置で生成すること、計量後半に SB が細かく BUP し SB 量が低下する部分的な熔融進行領域がスクリュ中間の観察位置で生成すること、それに引き続き熔融が遅れた低輝度の SB が出現することが共通して観察されることを明らかにした。

第 6 章では、結晶性樹脂のポリエチレンテレフタレート、ポリアミド、及び非晶性樹脂の汎用ポリスチレン、ポリカーボネートの 4 種類の樹脂について計量可塑化過程の可視化解析を実施し、樹脂ごとのスクリュ溝内熔融現象を具体的に明らかにした。また、各種樹脂に共通して計量初期にスクリュ溝内に空隙が生成し、やがて消失する現象を明らかにした。これは、待機時間中の伝熱により SB とシリンダ壁面間に熔融層が生成し、その潤滑作用により SB 移動が滞るため計量前半に空隙が生成し、その後のホッパー側 SB の押込みにより空隙が消失したものと推察された。

第 7 章では、計量可塑化過程でのスクリュの断続回転と軸方向移動という 2 つの因子を分離して解析するため、スクリュの軸方向位置固定のまま断続的に回転し、ノズルから樹脂を押出す間欠可塑化過程の可視化解析を実施した。両可塑化過程の擬似展開画像と SB 比の比較により 2 つの因子の効果を明らかにすると共に、マーカ追跡法により樹脂移動と可塑化形態変化の対応を解明した。その結果、断続回転の因子により、可塑化過程初期に供給部にて熔融相を多く内包する SB が形成され、その SB が後期に圧縮部に達して細かく分裂することを明らかにした。この現象は、スクリュ供給部での待機中に各ペレットの表層部から加熱を受けた低いかさ密度の樹脂ペレット群が、可塑化工程において圧縮・凝集する過程で SB 内層部からの昇温と高効率な熔融がもたらされ、その前後の SB と比べて熔融の進行が図られたものと考察した。また、軸方向移動の因子により、計量可塑化過程においてペレット供給位置から観察位置までの距離が徐々に短縮され、計量後半には伝達熱量の少ない SB が出現してきたためと考察した。以上の結果を総合して、待機時間及び計量工程におけるスクリュ溝内各部の SB の状態変化を示した計量可塑化過程モデルを提示した。

第 8 章 総括では、各章で得られた結論をまとめると共に、本研究において得られた BUP 生成モデル、計量可塑化過程の可視化解析手法、及び計量可塑化過程モデルに関する活用法について示した。最後に加熱シリンダ内可塑化現象に関する研究の課題と今後の展望を示した。