

論文の内容の要旨

論文題目 射出成形機における計量不安定現象の可視化解析と
安定化技術の開発

氏 名 高次 聡

射出成形は樹脂材料を可塑化し、金型の中で冷却・固化することで形状を付加する、代表的な樹脂加工法である。工業製品のグローバル化が進み、国際競争力が問われる中、射出成形においては、付加価値の高い成形品を効率よく生産することがますます求められている。すなわち、「高い形状精度を有する均質な成形品を繰り返し安定生産する」精密射出成形の実現が必要となる。精密射出成形に対する影響因子としては、材料因子および金型因子、成形機因子の3つが考えられる。本論文で取り上げる成形機因子では、可塑化部の加熱シリンダと可塑化スクリュにおいて、①射出される可塑化樹脂の品質を一定に均温化すること、②射出される樹脂体積を一定に管理すること、以上が重要となる。

同じく樹脂の可塑化を行う押出機のスクリュに関しては、均質な溶融樹脂を得るために、古くから様々な研究が行われ、スクリュ形状による可塑化樹脂の品質向上と生産性の追求が図られてきた。一方、スクリュ回転のみで連続可塑化する押出機とは異なり、射出成形機ではスクリュが回転しながら後進して計量可塑化が行われ、この際に偶発的に発生しやすい各種材料の噛込み不良や固体樹脂輸送の停滞などの「計量不安定現象」が均質な可塑化のための課題となっていた。そのため、成形工場では、計量時間がばらつかないことを監視するなどの手法により、品質の安定化に注意が払われてきた。続く射出過程では、スクリュが前進して金型内に溶融樹脂が射出される。射出過程中のスクリュ位置と速度については、油圧から電動サーボモータへと駆動方式が進化することで、大幅な精度向上が図られてきた。しかしながら、射出過程初期において、スクリュ先端に装填される逆流防止リングが構造的な理由から抱えている、その挙動ばらつきに起因する「射出量の変動」が課題として残されていた。量産現場での使用に耐え得る、逆流防止リング挙動ばらつき監視手段がなく、作業者の勘と経験に頼って射出量安定の維持が図られてきた。

そこで本論文では、計量可塑化過程における不安定現象の原因を解明し、安定性の高い加熱シリンダとスクリュ設計の知見を得ること、および射出過程における逆流防止リングの挙動監視機能と射出量安定化技術を開発することを研究目的とする。

本論文は、序章と総括を含めて3部、全9章から構成されている。

第1章序論では、加熱シリンダとスクリュにおける精密射出成形に向けた課題の提示と、従来研究の概要と課題について分析し、本論文の目的を述べた。

第I部では、計量工程における計量不安定現象の原因解明を目的としている。

第2章では、ホッパー下部におけるペレット挙動およびシリンダ内の固体輸送部から熔融が完了する圧縮部までを連続的に動的可視化することを可能とし、さらに同一の加熱シリンダの各観察位置でシリンダ内壁面温度分布計測も可能とする、ガラス内挿方式の可視化加熱シリンダを新たに開発した。また、PP（ポリプロピレン）の連続可塑化実験を通して、その有効性を実証的に明らかにした。

第3章では、前章で開発した可視化装置を用いて、PBT（ポリブチレンテレフタレート）を含む各種樹脂についてホッパー下部における噛込み状況を定量的に解析した。次に、噛込み不良を呈し易いPBTに着目して、ホッパー下部とシリンダ内の固体輸送部を同時観察し、噛込み不良発生時のペレット挙動を解析したところ、ペレットとスクリュ・シリンダとの摩擦力バランスの影響が示唆された。そこで、ペレットと金属表面との摩擦係数を計測するために、樹脂ペレット摩擦試験機を提案・試作し、各種樹脂ペレットの表面摩擦係数と温度との相関を詳細調査した。これらの結果とスクリュ・シリンダの表面温度計測結果とを総合し、PBTにおける噛込み不良発生機構を解明した。

第4章では、シリンダのホッパー口形状が固体ペレット輸送状況に与える影響評価を目的として、ホッパー下部とシリンダ内の可視化観察実験を行った。同一のスクリュ形状の下に、3種類のホッパー口形状が、3種類のペレット形状の噛込み挙動に与える影響調査、さらには可塑化能力との相関解析を実施した。その結果、結晶性樹脂の代表としてのPPおよびその粉碎材混入材、非晶性樹脂代表のGPPS(汎用ポリスチレン)のいずれにおいても、異なるホッパー口形状がホッパー下部でのペレット供給速度に有意差を生じさせること、また可塑化能力にも影響を与えることを明らかにした。

第II部では、飢餓供給時のペレット挙動と可塑化状況の調査、およびスクリュ形状が計量不安定現象に及ぼす影響評価を目的としている。

第5章では、第3章で解明した特定のPBTの噛込み不良現象に対して、経験的対応策の一つとして知られる飢餓供給を適用し、ホッパー下部およびシリンダ内可視化観察を実施した。ここで飢餓供給とは、通常の満杯供給に対して、可塑化スクリュ本来の固体輸送能力を下回るように樹脂ペレット量を制限し、ホッパー口から供給する方法である。その結果、固体輸送領域ではペレット塊を形成せず個々のペレットが転がりながら移動するため

に、摩擦力バランスの課題から解放され、噛込み不良発生が抑制されることが明らかになった。樹脂の可塑化には、加熱ヒータからの伝熱とスクリュによるせん断発熱による熱エネルギーが必要であるが、飢餓供給では伝熱主体のエネルギー供給形態となり、スクリュ低回転速度時においては効率の良い可塑化が行われることが確認された。

第 6 章では、固体輸送および可塑化・溶融体輸送の全般に深く関わるスクリュ形状について調査を実施した。スクリュ形状に関する従来研究は、可塑化品質の向上に主眼が置かれており、溝深さ、圧縮比、供給・圧縮・計量の各ゾーンの長さ、溶融樹脂の均温化を目的としたバリアフライトやミキシングセクションなどが主な対象であった。そこで、本章では、固体から溶融体まで影響を与えることが予想される、フライトピッチ P について、その可塑化状況の可視化観察を行い、さらにノズルからの射出樹脂温度分布計測によって可塑化樹脂の品質を調査した。その結果、押出機と同様の連続可塑化では、スクリュ外径 D との比 $P/D = 1.0$ のスクリュで最も性能バランスがよいこと、計量可塑化では、 $P/D = 0.7$ スクリュの可塑化樹脂の温度低下が少なく標準偏差が小さいことを確認し、フライトピッチが可塑化品質向上への指標となることを明らかにした。

第 III 部では、射出安定化技術の開発を目的としている。

第 7 章では、射出過程における不安定因子であった逆流防止リング動作の検出方法を確立することを目的とし、電動射出成形機に搭載されたスクリュ回転用サーボモータの負荷により逆流防止リングの動作を検出する新たな手法を開発した。この新たな検出手法は、逆流防止リングおよびシリンダ、成形機本体に特別な加工やセンサ追加を行う必要がなく、量産成形をしている標準的な射出成形機にて利用が可能である。本章では、開発した逆流防止リングの動作検出方法の有効性を検証するとともに、この方法の効果として射出中に発生する樹脂の逆流現象が成形品重量に及ぼす影響を調査した。

第 8 章では、射出量安定化技術を開発することを研究目的として、計量過程終了後に速やかにスクリュ逆回転・前進動作を行い、リングの後退・閉鎖を促進する制御手法によりフロントフローおよびバックフローを抑制する、新たなスクリュ制御方法を開発した。また、前章で開発した逆流防止リング動作検出機能により、制御パラメータの最適値を自動設定できるように試みた。本章では、この射出量安定化手法の有効性を検証するため、各種制御パラメータが成形品重量に及ぼす影響を調査した。

第 9 章総括では、各章で得られた結論を纏めるとともに、射出成形機実機への適用について示した。最後に、射出成形機を取り巻く課題と、今後の展望について述べ、本論文の締めくくりとした。