

博士論文（要約）

射出成形機における繊維強化樹脂
可塑化過程の可視化実験解析と
繊維折損の評価

馬 賽

射出成形は、mg から数 10 kg までの 3 次元形状の工業製品を、精密に大量に高速に供給できる主要なプラスチック成形加工技術に位置づけられる。高い耐衝撃性と剛性、軽量化効果を背景として、ガラス繊維等の繊維強化樹脂が、金属代替材料として様々な業界で広く用いられているが、その射出成形品の機械的強度は内部の残存繊維長および分散により大きな影響を受ける。より長い平均繊維長を得るために、短繊維に加えて、近年では長尺の長繊維ペレットが広く用いられるようになったが、成形機投入直後のペレット内長尺繊維も、スクリュ可塑化過程と金型内流動過程で次第に折損することは避けられない。ガラス長繊維は (1) 加熱シリンダ内での可塑化過程、(2) 計量時のチェックリング通過過程、また (3) 金型内の流動過程で順次折損する。しかし、長繊維強化樹脂の射出成形品において最大限の機械的特性を引き出すためには、ペレット内の繊維束の解繊と均一分散の実現に加えて、繊維折損の抑制が大きな課題となっている。本研究では、繊維折損への影響因子に注目し、樹脂が金型に入るまでの加熱シリンダ内現象として (1) 可塑化過程と (2) チェックリング通過過程を研究課題に掲げる。前者では、これまで全く明らかにされていなかったガラス繊維強化樹脂の可塑化過程を明らかにすることを課題とし、繊維折損現象と可塑化過程との関連を明らかにする。後者では、経験的には理解されていたチェックリング通過時の繊維折損が具体的にどの程度引き起こされ、またどのような形状因子により促進されるかを明らかにすることを課題とした。

そこで、本研究では以下の 3 つを研究目的として掲げた。

- [Ⅰ] ガラス繊維強化樹脂への可視化加熱シリンダ適用可能性を検討すること。
- [Ⅱ] 連続および計量可塑化条件下でガラス長繊維強化樹脂の可視化解析を行い、可塑化過程と繊維長分布との相関を検討すること。
- [Ⅲ] シリンダ内においてチェックリングを通過する際の繊維折損状況を明らかにし、繊維折損とチェックリング形状との相関を検討すること。

本論文は、序論と総括を含めて 6 章で構成されている。

第 1 章序論では繊維強化樹脂のスクリュ可塑化現象の解明、繊維折損過程の解明に関する従来研究の概要と問題点について分析し、解明すべき課題を抽出し、本研究の目的を明らかにした。

第 2 章では、高い圧力の生成とガラス内面の粗面・不透明化の懸念により、可視化加熱シリンダの適用がこれまで回避された繊維強化樹脂への適用性を検討するため、ガラス短繊維強化 PP (ポリプロピレン) を用いた 150 rpm までの可塑化過程の可視化解析を行った。計量・供給・圧縮部でのソリッドベッド、メルトプールの形成、ブレイクアップ現象の生成を明瞭に捉えて定量的に解析できることを初めて明らかにし、さらにフルフライトスクリュの圧縮比がガラス繊維強化樹脂の連続可塑化過程に及ぼす影響についても具体的に明らかにした。特にガラス短繊維強化樹脂では溶融が促進されていたため、早期に漏洩流が発生し、溶融樹脂が押側フライトを乗り越えて隣の引側フライト開始領域に溜まる様子を確認した。以上の可視化結果に基づき、その溶融モデルを提示した。具体的には、ガラス短繊維強化 PP の可塑化過程モデルは、短繊維のペレット内均一分散とペレット形状の類似性により、非強化 PP と本質的に大きな差異がなく、Maddock-Tadmor 型から Dekker-Lindt 型の溶融モデルへの遷移ならびにソリッドベッドのブレイクアップ現象を伴うことを明らかにした。

第3章では、短繊維強化樹脂での成果に基づき、本来の目的であるガラス長繊維強化PPを用いた可塑化過程の可視化解析を行った。圧縮比の違う3種類のフルフライトスクリュを用いた可塑化実験により、ソリッドベッドとメルトプールの生成に加えて、低圧縮比の浅溝スクリュでは飢餓供給により空隙を形成する不安定な熔融過程が、また高圧縮比の深溝スクリュでは明瞭なブレイクアップの生成状況がそれぞれ可視化され、スクリュ圧縮比により可塑化過程が大きく変動することを明らかにした。また圧縮比が高いほどスクリュトルク、樹脂圧力が増大し、繊維長が短くなることを具体的に明らかにした。以上の可視化結果と計測データを総合して、長繊維強化樹脂の熔融モデルを提示し、特に浅溝・低圧縮比スクリュでは飢餓供給域での繊維束が綿状に膨張することで、続く圧縮部での干渉による繊維折損が抑制されるなど、熔融モデルと相関して繊維折損分布も相違することを明らかにし、さらに平均繊維長が長くなるスクリュでは、繊維長分布の形態も大きく異なることを示した。

第4章では、射出成形のスクリュとシリンダの相対位置が成形サイクルに対応して間欠的・周期的に変動する非定常計量可塑化過程において、成形条件（回転数・背圧・計量値・待機時間）を変化させ、ガラス長繊維強化PPのフルフライトスクリュでの計量可塑化可視化実験を実施した。長繊維強化樹脂の計量可塑化過程と計量時繊維長分布との相関について具体的に調査し、計量過程では一時的な空隙の形成とともに、フライトに直交して配向する長尺ペレットがフライト方向へと回転する挙動が観察された。射出樹脂内の重量平均繊維長が、射出中盤に一時的に減少傾向を示すことを明らかにした。また、待機時間が繊維長分布に及ぼす最も大きな影響因子であること、待機時間が一定条件の下では、低回転数、低背圧、短い計量値により繊維の折損が抑制されることを明らかにした。

第5章では、極めて煩雑な作業を要するスクリュ冷却引抜法に対して、シリンダ内の繊維折損状況を分析するため、加熱シリンダの側壁部から内部の樹脂を多点で採取するインプロセス・サンプリング装置を提案・試作し、熔融樹脂をインプロセスで採取できることを示した。同装置により、チェックリングを通過する前後の樹脂を直接採取し、チェックリングの寸法形状としての長さ、当り面角度、閉鎖ストローク、隙間寸法、ツメの数、以上の各因子が、ガラス繊維折損へ与える影響について、具体的に調査した。チェックリング部に、熔融樹脂が緩やかに流入・通過できる大きな空間が確保され、またチェックリング前後の樹脂流動が急峻に変化しない形状ほど、すなわちスクリュヘッドとチェックリングの隙間寸法が大きく、閉鎖ストローク量が大きく、当り面角度が小さく、爪が無い方が、長繊維の折損が抑制されること、一方でチェックリングの長さは余り影響しないことを明らかにした。

第6章では、各章で得られた結論を要約した。また本研究を総合評価し、繊維強化樹脂の熔融モデル、計量可塑化過程の解析手法、計量可塑化過程と計量時繊維長分布との相関モデル、インプロセス・サンプリング装置の活用法等について、工学的・工業的立場づけから総括した。最後に繊維強化樹脂の可塑化過程に関する今後の展望を示した。