

論文の内容の要旨

論文題目 超高速射出成形現象の実験解析

氏名 長谷川 茂

射出成形分野では、製品の多様化、高付加価値化に対応した成形品を低コストで実現するための新成形法の開発が盛んに行なわれている。本研究の主題である超高速射出成形法もその一つで、とりわけ薄肉成形品の実現とそれによる製品の高付加価値化に大きく貢献している。

同成形法は、超高速のスクリュ射出によって熔融樹脂を金型内に充填するもので、射出成形機の最大スクリュ射出速度は、汎用機の100から200mm/sに対して、その5倍から10倍以上に達する。また、超高速充填過程ではノズル部で 10^5s^{-1} 、ゲート部では 10^6s^{-1} から 10^7s^{-1} 以上の極めて大きなせん断速度を伴いながら樹脂が流動することとなる。こうした短時間内での樹脂の充填により、流動樹脂の冷却を抑制する効果、非ニュートン流体の粘度特性に基づくせん断速度の増加による樹脂粘度の低下効果、ノズル部およびゲート部でのせん断発熱による樹脂粘度の低下効果、これらの効果を積極的に利用することで薄肉部への完全充填を可能としている。また、成形品の薄肉化は、原料費の削減効果、冷却時間の短縮によるハイサイクル化をもたらすこととなる。そのため、超高速射出成形法は製品の高付加価値化と低コスト化とを同時に実現する成形法として、今後益々注目されるものと考えられる。

しかしながら、超高速充填現象については、ほとんど研究されておらず未解明の課題が多く残されている。とりわけ、超高速充填過程では、熔融樹脂が型内残留ガスを急圧縮しながら流動することとなる。そのため、超高速充填現象の解明には、型内残留ガスの影響を明らかにし、樹脂圧力および温度変化をインプロセスで評価すること、型内樹脂流動挙動を直接可視化観察することがそれぞれ重要となる。そこで本論文では、超高速充填過程のインプロセス計測と、超高速充填挙動の動的可視化手法の確立を研究目的としている。

本論文は、序論と総括を含めて 2 部、合計 9 章より構成されている。

第 1 章の序論では、汎用の射出成形において確立されてきた各種実験解析法と、超高速射出成形に関する研究事例をそれぞれ整理した。そして、超高速射出成形においてこれまで検討事例がなく解明が求められる課題について分析し、本研究の目的を明らかにした。

第 I 部は、超高速充填過程における型内残留ガスの影響、スクリュ射出の加速性能（以下、立ち上がり特性）の効果、これらをインプロセスで評価することを目的とした。超高速充填過程では、型内残留ガスがこれまで以上に樹脂の流動特性、成形品の外観および内部構造に影響を及ぼすこととなる。しかしながら、型内残留ガスの影響評価については国内外問わず行なわれた事例がなく、残留ガスを考慮した充填特性評価金型の開発が課題となっていた。

そこで第 2 章では、フローフロント通過タイミングと型内ガス圧力とを同時計測することが可能で、且つ残留ガスの排気条件（ガスベント条件）が可変構造の薄肉バーフロー金型を開発した。そして、ガラス繊維強化 LCP (GF 強化 LCP) を試験材料として、成形品表面の膨れ欠陥（ブリスター）とガスベント条件との相関について評価した。これにより、残留ガスを強制排気することで、超高速充填でもブリスター生成が抑制できることを明らかにし、ブリスター生成時のスプルー内充填メカニズムを提示した。

第 3 章では、薄肉バーフロー金型を用いて、ガスベント条件およびスプルー容積の変化が薄肉キャビティの充填特性に及ぼす影響をそれぞれ評価した。その結果、型内で圧縮された残留ガスが流動終端部のフローフロントの前進を阻害していること、スプルー容積の縮小によって樹脂圧力の昇圧速度が上昇し、フローフロント前進速度が増加することをそれぞれ定量的に明らかにした。すなわち、薄肉キャビティへの樹脂の充填性を

向上させるためには、型内残留ガスを強制的に排気し、スプルー容積を縮小することが極めて重要であることを明らかにした。

第4章では、第3章で明らかにした真空引き(強制排気)の効果を超薄肉成形において実証的に明らかにすることを目的とした。ここでは、矩形キャビティ(厚さ 0.5 mm)の中央部にガスベント条件が可変構造の極薄肉部(厚さ 0.05 mm)を有する部分薄肉キャビティを提案した。そして、型内残留ガスを真空引きにより強制的に排気することで、極薄肉部の充填性が向上し完全充填に要する樹脂圧力が減少すること、それにより充填過程での金型の弾性変形(型開き)が低減し、成形品の薄肉化が効果的に図れることを定量的に明らかにした。

第5章では、上記の部分薄肉キャビティを用い、スクリュ射出の立ち上がり特性が極薄肉領域の充填特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。ここでは、キャビティ内に樹脂圧力および型開きセンサを組み込み、スクリュ射出の立ち上がり特性の高速化によって極薄肉部の充填性が向上し、それにより樹脂圧力および型開き量が減少することで成形品の薄肉化が図れることを確認した。さらに、超高速充填時のフローフロント領域の温度計測に対して、これまでにない応答性を有する高応答赤外線放射温度計(応答時間 8 μ s, 95%)を適用し、立ち上がり特性の高速化によって、フローフロント領域の温度が上昇していることを初めて実測により捉え、同特性の効果を具体的に明らかにした。

第II部は、超高速充填過程における型内樹脂流動挙動の動的可視化手法を確立することを目的とした。汎用の射出成形では、これまでさまざまな可視化手法が提案されてきた。とりわけ、横井らが提案したガラスインサート金型は、型内での樹脂挙動と各種成形不良の生成メカニズムの解明に大きく貢献してきた。しかしながら、超高速充填挙動については、これまで直接可視化された事例がなく未知の領域となっていた。

そこで第6章では、従来のガラスインサート金型のプリズムガラスの耐圧強度向上を図った超高速充填対応ガラスインサート金型を提案した。そして、厚さ 0.5 mm の薄肉矩形キャビティを用い、ゲート形状をファンおよびサイドゲートに変化させて超高速充填過程までの可視化観察に初めて成功した。これにより、ファンゲートの低速充填では、ゲート内部での樹脂滞留とそれによる冷却・固化作用によって、キャビティ内で特異な充填パターンが生成すること、一方の超高速充填では、ゲート形状によらず、

いずれもキャビティ幅中心線上のフローフロントが側面側よりも先行した凸状の充填パターンへと変化することをそれぞれ定量的に明らかにした。

第 7 章では、樹脂流路が主ランナーから傾斜 3 方向に分岐する Y 字型ランナー、主ランナーからサブランナーが十字状に順次分岐する十字型ランナー、以上の 2 種類のランナー型キャビティを提案し、分岐部での慣性力の発現とそれによる樹脂の充填挙動の変化を評価した。非強化 PP および GF 強化 LCP を用い、低速から超高速充填過程までの可視化観察を通して、いずれの樹脂においても主ランナー内のフローフロント前進速度が 25~30 m/s、せん断速度で約 10^5 s^{-1} 以上の領域から、樹脂が流動直進方向にのみ進もうとする慣性流れが発現することを初めて具体的に明らかにした。

第 8 章では、第 2 章で提示した GF 強化 LCP におけるブリストア生成時のスプルー内充填メカニズムを実証するために、スプルー型キャビティを提案し、射出率によって樹脂の充填挙動がどのように変化するかを評価した。とりわけ、GF 強化 LCP では、毎秒 100 万コマまでの撮像速度を有する超高速ビデオカメラを用い、スプルー内残留ガスが流動樹脂に巻き込まれる際の超高速充填時の特徴的な樹脂の充填挙動を明らかにし、ブリストア生成時のガス巻き込みモデルを具体的に提示した。

以上のように、本論文の第 I 部では、超高速充填過程のインプロセス計測を通して、超高速充填時の型内残留ガスおよびスプルー容積の影響を明らかにした。また、これまでにない応答性を有する高応答赤外線放射温度計を提示し、超高速充填時のフローフロント領域の温度計測を通して、スクリュ射出の立ち上がり特性の効果を実証的に明らかにした。また第 II 部では、超高速充填対応ガラスインサート金型を提案しキャビティ、ランナー、スプルー領域をそれぞれ可視化領域に構成し、これまで可視化観察された事例がない型内での超高速充填挙動を明らかにすることに成功した。そして、これらの可視化解析実験を通して、本金型および本可視化実験解析手法が超高速充填挙動の解明と不良生成メカニズムの解明に適用できることを実証した。

最後に第 9 章の総括では、各種実験解析で得られた結論をまとめて整理し、本論文の成果を述べた。さらに、超高速射出成形技術を活用するための知見と今後の課題を述べ、最後に超高速射出成形の研究に関する今後の展望を示した。