

# 博士学位論文審査要旨

2017年2月17日

論文題目：射出成形におけるスクリュ形状の最適化に関する研究

学位申請者：井上 玲

審査委員：

主査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 田中 達也

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 山口 博司

副査：金沢工業大学工学部機械工学科 教授 山部 昌

要 旨：

多様化する樹脂材料の射出成形において、目的に応じた可塑化状態を得るための高度な可塑化技術が求められている。射出成形における可塑化装置は、加熱シリンダとスクリュを組み合わせた機構が用いられ、その可塑化現象はブラックボックス化していることから、多くの課題を抱えている。本論文では、所望の熔融状態に対する可塑化現象を明らかにし、スクリュ形状の最適化手法を確立することを目的としている。

本論文は全9章から構成され、第1章は本研究の背景および目的について述べている。第2章では、流動シミュレーションを用いたスクリュ形状の最適化指針が検討され、独自の概念として平均せん断応力を用いて可塑化現象の定量化について述べている。第3章及び第4章では、第2章での検討結果を基に、可塑化中のガス発生を抑制するスクリュ形状と繊維強化樹脂の繊維長と分散性を向上するためのスクリュ形状に関し、実際にスクリュ形状の最適化が行われ、検討の妥当性を検証している。第5章では、第4章で行った繊維長と分散性に対する検討を深めるため、解析精度を向上させ、それぞれの影響因子について検証している。第6章では、第5章での検討を基に、樹脂熔融粘度の繊維長と分散性に与える影響を調査し、ダルメージ形状におけるせん断応力の繊維長に対する支配的因子が示されている。さらに第7章では、特徴ある形状に対して部分的に流動シミュレーションとその検証実験が行われ、繊維分散性に対する支配的因子を明らかにし、影響因子を明確にすることで精度の高い形状の最適化が可能であることが示されている。第8章では、CADと流動シミュレーションを利用して最適化したスクリュ形状を3Dプリンタで試作後、疑似流体を用いた可視化モデル実験により、第7章で検討された可塑化現象を検証し、新規スクリュ形状の開発手法としての有効性が示されている。第9章では、本研究で得られた知見を総括し、今後の展望について述べている。

以上のように本論文は、射出成形におけるスクリュ形状の最適化において、流動シミュレーションによる検討の有効性が示され、モデル実験による可視化実験解析手法を提案し、新規スクリュ形状の開発手法を構築しており、工学的ならびに工業的にもきわめて価値のあるものと評価できる。よって本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

## 総合試験結果の要旨

2017年2月17日

論文題目：射出成形におけるスクリュ形状の最適化に関する研究

学位申請者：井上 玲

審査委員：

主 査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 田中 達也

副 査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 山口 博司

副 査： 金沢工業大学工学部機械工学科 教授 山部 昌

要 旨：

本論文の提出者は、2011年4月に同志社大学大学院 理工学研究科 機械工学専攻 博士課程（後期課程）に入学し、2014年3月単位取得後に中退している。

本論文の主たる内容は、高分子論文集、プラスチック成形加工学会誌、Journal of Composite Materials に各1編の論文として出版公表され、2015年6月にはプラスチック成形加工学会において論文賞を受賞している。また、International Conference Plastic Molding Asia, International Polymer Conference, Polymer Processing Society Conference の国際会議においても各1件の論文発表を行い、内外の学会において十分な評価を得ている。

2017年1月14日午後1時より約2時間にわたり、提出論文に関する博士論文公聴会が開かれ、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに公聴会終了後、審査委員により学位論文に関連した諸問題につき口頭試問を実施した結果、いずれも十分な学力を有することが確認できた。なお、提出者は、英語による論文発表や語学試験にも合格しており、十分な語学力を有しているものと認められる。

以上より、本論文提出者の専門分野に関する学力、ならびに語学力は十分であることが確認できた。よって総合試験の結果は合格であると認める。

# 博士學位論文要旨

論文題目： 射出成形におけるスクリュ形状の最適化に関する研究  
氏名： 井上 玲

## 要旨：

射出成形は、樹脂材料の成形加工の中で最も代表的な加工方法であり、家庭用品をはじめ自動車部品や家電製品、医療製品、食品容器、建材部品など幅広い分野で使用されている。射出成形は、樹脂成形品の大量生産を行うことから、生産性向上と品質の安定化が重要となる。近年においては、さまざまな高機能樹脂が開発され、目的に応じた熔融状態を得るための高度な可塑化技術が必要となっている。射出成形における可塑化装置は、樹脂材料を短時間で均質に熔融させるために、加熱シリンダとスクリュを組み合わせた機構が用いられ、その可塑化現象はブラックボックス化していることから、多くの課題を抱えている。そのため、スクリュ形状の最適化は試行錯誤を繰り返すことを余儀なくされ、可塑化現象の解明とスクリュ形状の最適化手法を確立することが求められている。

目的の熔融状態を得るためには、ブラックボックス化された可塑化現象に対しその本質を見極める必要がある。これまで、シリンダ内での可塑化現象を明らかにするため、静的・動的可視化実験等の数多くの検討が行われ、樹脂材料が固体から熔融状態に至る過程が検討されてきた。しかし、これらの検討は、表面からの観察による2次元での検討結果であり、3次元的に作用する可塑化現象の解明には至っていない。また、スクリュ形状の最適化検討においては、複数の形状の異なるスクリュを用いた実験的な解析が大半であり、目的の熔融状態に対して最適なスクリュ形状の検討指標として有用な情報であるが、定性的な説明に偏りやすく多くの課題を残している。事実、実際のスクリュ形状の最適化は、複数回の検討と試作を繰り返しており、スクリュ形状の開発に相当の時間が必要となっている。

そこで本研究では、所望の熔融状態を得るためのスクリュ形状に対する可塑化現象を明らかにし、スクリュ形状の最適化手法を確立することを目的とした。スクリュ形状の最適化検討に際し、まずは流動シミュレーションを用いて可塑化現象を多面的に定量化することを試みた。そして、目的の可塑化現象に対する影響因子を明確にし、具体的にスクリュ形状の最適化から一連の検討の妥当性を確認するために、検討したスクリュを実際に試作し可塑化検証を行った。さらに、新規スクリュ形状の開発手法として、3Dプリンティングにより製作したスクリュを用い、疑似流体による可視化観察を提案し、実際の可塑化現象に近いモデル実験が可能であることを確認することで、本手法の有効性を示した。

本論文は、序論と総括を含めて全9章から構成される。

第1章の序論では、射出成形機の生い立ちから樹脂材料の可塑化装置の変遷と現状の構成に対し、近年求められる可塑化技術の課題を整理し、本研究の目的を述べた。

第2章では、流動シミュレーションを用いて可塑化現象の定量化を行い、現象の本質を明確にするとともに、スクリュ形状の最適化指針を検討した。最適化検討には、目的の可塑化状態を得るために必要な現象を多面的に定量化するため、4本の形状の異なるスクリュを対象とし、粒子追跡法による検討を行った。その結果、各スクリュによる熔融状態を独自の概念である平均せん断応力を用いることで、定性的に表現できることが明らかとなり、粒子追跡法による検討がスクリュ形状の最適化に対し、有用な手段であることが期待された。

第3章では、第2章で得られた結果を基に、可塑化中に発生するガスを抑制するスクリュ形状の最適化を行った。最適化に際しては、ガスの発生は可塑化中の平均せん断応力に依存すると仮

定し、可塑化能力を従来型スクリュと同等にした低せん断スクリュ形状を考案した。その結果、目的としたガス抑制効果をはじめ、スクリュ表面への樹脂滞留付着現象や、成形性能に対しても粒子追跡法による結果と定性的に一致することを確認した。また、可塑化現象を定量化することで、可塑化中のガス発生要因がせん断応力ではなく、スクリュ内での樹脂の滞留時間が支配的要因であることが明らかとなった。

第4章では、可塑化中の混練と分散に対し、繊維強化樹脂 (FRTP) の繊維長と分散性を対象に、第3章と同様に形状の最適化を行った。その結果、可塑化中の繊維折損と繊維分散性に対し、可塑化現象として平均せん断応力が支配的であることが確認され、それぞれが技術的に対立の関係にあることが明らかとなった。さらに、この対立する関係を両立させるためのスクリュ形状の最適化を検討し、FRTPの可塑化に有効なスクリュ形状の設計指針を得た。

第5章では、4章における検討を深めるために、繊維折損と繊維分散性に対し、樹脂粘度のせん断作用に及ぼす影響に着目した。特に、せん断作用を考慮した場合、せん断発熱による樹脂の粘度変化の影響を考慮することで、より精度の高い解析結果が得られると考え、解析条件を等温から非等温解析に変更した。また、繊維折損と繊維分散性の2つの特性に対し、両特性をそれぞれ別の因子を用いて現象を定量化することでより詳細な検討を行うことができると考え、新たに総せん断ひずみ量を繊維分散性の指標として検討を行った。その結果、繊維折損に対して平均せん断応力、繊維分散性は総せん断ひずみ量が支配的因子であることが確認され、ダルメージ形状が繊維分散性に対し有効であるものの、同部で発生する過大なせん断応力が樹脂粘度に強く依存することを示唆する結果を得た。

そこで第6章では、樹脂粘度に対する繊維折損と分散性の影響を明らかにするため、ダルメージ形状部における平均せん断応力と総せん断ひずみ量の関係に着目した。せん断応力は、樹脂粘度とせん断速度と比例関係にあることから、ダルメージ部における樹脂粘度を考慮することで繊維折損を最小限に抑えることが可能であると考えられる。さらに、せん断ひずみ量を大きくすることで繊維分散性の向上が期待できることから、さらなる形状の最適化を検討した。その結果、平均せん断応力は樹脂粘度に強く依存し、総せん断ひずみ量はダルメージ形状に依存することが明らかとなった。つまり、ダルメージ部を有するスクリュは、ダルメージ部の手前で樹脂が完全溶解する形状とすることで、繊維折損と繊維分散性を両立することが可能であることを示した。

さらに第7章では、ダルメージ形状の最適化を検討した。本研究で用いたダルメージ形状は、既存の形状を用いていたことから、ダルメージ部における繊維折損と繊維分散性に対する影響因子を明確にすることで、形状を最適化する余地があると考えられる。また、これまでの研究では、流動シミュレーションと可塑化実験はスクリュ形状全域を対象にしてきたため、ダルメージ形状等、特長ある形状に対して直接的影響を確認することができていなかった。そこで、特長ある形状に対して部分的に流動シミュレーションと静的可視化実験を行い、可塑化現象を詳細に調査しダルメージ形状の最適化を行った。その結果、部分的評価を行うことで、平均せん断応力と繊維折損の関係がより明確になり、その中でもダルメージ部における折損が著しいことが明らかとなった。一方、繊維分散性については、スクリュ全域における評価においても総せん断ひずみ量と強い相関関係にあることが確認されたが、繊維折損の防止と両立するためには、ダルメージ形状部における滞留時間が支配的因子であることが明らかとなった。

第8章では、新規スクリュの開発手法の検討を行った。前章までの検討において、流動シミュレーションを用いた検討が、可塑化現象の定量化とスクリュ形状の最適化に対し有効であることを確認した。しかし、検討の妥当性を確認するためには実際にスクリュを試作し、可塑化実験を行う必要があった。この時、可塑化実験に使用するスクリュの製作期間は数か月必要となり、場合により繰り返し回数の増加と共に開発期間が長期化するため、新たな評価手法を検討した。そこで、可視化手法として、スクリュは3Dプリンタにより造形し、疑似流体を用いたモデル実験を提案し、第7章で最適化したダルメージ形状に対し、実際の可塑化現象を可視化することで本

手法の妥当性を確認した。その結果、最適化したダルメージ部の形状効果を確認することができ、実際の可塑化現象を可視化確認する手法としての有効性を示した。

第9章では本研究の総括として、各章で得られた結論をまとめると共に、スクリュ形状の研究開発に対し今後の展望を述べ、本論文の締めくくりとした。