

博士学位論文審査要旨

2023年1月17日

論文題目： 射出成形における樹脂熔融状態に関する研究

学位申請者： 下楠 蘭 壮

審査委員：

主査：理工学研究科 教授 田中 達也

副査：理工学研究科 教授 大窪 和也

副査：理工学研究科 教授 笹田 昌弘

要 旨：

射出成形における可塑化工程での樹脂の熔融状態を把握することは、成形不良現象の改善につながり生産性を向上させるために非常に重要であると考えられている。また、近年 AI 化、IoT が進む中で、可塑化条件を自動的に最適化する技術開発が進められている。これらの実現には、可塑化条件により樹脂の熔融状態がどのように変化するかを具体的に捉える技術の確立が求められる。本研究は、可塑化完了後の樹脂の熔融状態を評価する手法を確立したうえで、可塑化条件が及ぼす影響を明らかとすることに努めた。本論文は全5章で構成され、第1章では、射出成形を中心に成形加工装置の変遷から、成形加工技術の進化が今日の社会の発展に繋がってきたことを述べている。特に、その中でも重要な役割を担ってきた樹脂の熔融状態に着目し、近年の製品技術動向から要求される機能に対しての課題を纏め、本研究の意義と目的を述べている。第2章では、可塑化完了後の樹脂の熔融状態を把握することを目的に、金型に射出する直前の樹脂の温度・密度・粘度のパラメータが均一かどうかを評価する方法を検討している。具体的には、可塑化工程で樹脂が受けるせん断応力によるエンタルピーの増加としてのエネルギー量が樹脂の熔融状態に影響すると考え、市販の高粘度の樹脂流動解析ソフトを用いて、スクリュ内の樹脂流動の可視化を試みている。第3章では、1サイクル中における樹脂の熔融状態がどのような状態であるかを評価する手法を確立することを目的に、成形機から得られるデータおよびノズル内の樹脂圧力の分析、ならびにシミュレーションから得られる結果の比較をおこなっている。第4章では、可塑化工程中のスクリュの後退挙動に着目し、これらから樹脂の熔融状態の均一性を評価できないか試みている。結果として、スクリュの後退速度を安定させることが樹脂の均一な熔融を評価する指標となることが示唆されている。第5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ともに、射出成形における可塑化後の樹脂の熔融状態について把握することの重要性と今後の展望について述べている。本論文は射出成形における樹脂の熔融状態を評価する手法の確立に向けて工学的有用性を発揮でき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

2023年1月17日

論文題目： 射出成形における樹脂溶融状態に関する研究

学位申請者： 下楠 蘭 壮

審査委員：

主査：理工学研究科 教授 田中 達也

副査：理工学研究科 教授 大窪 和也

副査：理工学研究科 教授 笹田 昌弘

要 旨：

本論文提出者は、2015年3月、同志社大学大学院理工学研究科機械工学専攻 博士課程（前期課程）を修了した。2017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、2020年3月に退学、その後2022年9月に再入学し現在在籍中である。

本論文の主たる内容は、WIT Transactions of Engineering Sciences, Vol.125, pp.49-59 (2019), ハリス理化学研究報告, Vol.63, No.3, pp155-162 (2022) にも掲載され十分な評価を受けている。

2022年12月17日午後1時より約1.5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、論文に関する諸問題につき口頭試験を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。なお、提出者は、英語による口頭発表及び論文提出を何度か経験していることに加え、語学試験にも合格しており、十分な語学能力を有すると認められている。以上より、本論文提出者の専門分野に関する学力並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： 射出成形における樹脂溶融状態に関する研究

氏名： 下楠 蘭 壮

要旨：

我々の身の回りには、各種食品容器、食器や文房具から家電製品まで、さまざまな大きさ、形状のプラスチック製品が存在し、今日の文化的生活はこれらのプラスチック製品によって支えられているといっても過言ではない。このようなプラスチック製品はプラスチック材料（多くの場合、石油を原料とする合成高分子からなる）を所定の形状に成形してつくられるが、身の回りの大半の樹脂成形品が射出成形法により製造されている。射出成形は、他の成形方法と比較し、短いタクトタイムで複雑な形状を賦形できる特徴がある。しかしながら、多くの成形不良現象も存在する。これらの成形不良は樹脂可塑化工程に起因するものが多いとされる。粘弾性の特性を持つ樹脂は、高温・高圧の条件下で溶融・混練されるが、シリンダ内部での現象であるため視認することはできない。そのため、射出成形において樹脂の溶融状態を正確に把握することは困難とされてきた。可塑化工程での樹脂の状態を把握することは、成形不良現象の改善につながり生産性を向上させるために非常に重要であると考えられる。樹脂を可塑化溶融させるという観点においては、これまでに行われてきた研究から、現象が体系化され実用に供している。しかし、具体的に射出成形の可塑化工程完了後の樹脂の溶融状態の均一性について確立された評価手法が見当たらず、成形品の状態によって判断している状況である。近年 AI 化、IoT が進む中で、可塑化条件を自動的に最適化する技術開発が進められている。これらの実現には、可塑化条件により樹脂の溶融状態がどのように変化するかを具体的に捉える技術の確立が求められる。

そこで本研究では、射出成形機の可塑化装置における樹脂材料の可塑化現象に対し、可塑化完了後の樹脂の溶融状態を成形機、金型に取り付けたセンサからの情報や流動解析を用いることにより明らかにし、評価する手法を確立したうえで、可塑化条件が及ぼす影響を明らかとすることを目的とした。具体的には、可塑化完了後の樹脂の溶融状態を把握するため、金型に射出する直前の樹脂の温度・密度・粘度のパラメータが均一かどうかを評価する方法を検討した。そして、1 ストローク中の樹脂の溶融状態のばらつきを捉える手法を確立するため、スクリュ回転速度を変化させて、樹脂がスクリュから受けるせん断エネルギー量の違いについて検討した。さらに、溶融粘度に関係するスクリュ後退速度について着目し、各条件がスクリュ後退速度に与える影響と可塑化条件を変更した場合における樹脂の溶融状態を評価し、一連の検討の妥当性を実証し、評価手法の有効性を示した。

本論文は、序論と総括を含めて5章から構成される。

第1章の序論では、射出成形を中心に成形加工装置の変遷から、成形加工技術の進化が今日の社会の発展に繋がってきたことを述べた。特に、その中でも重要な役割を担ってきた樹脂の溶融状態に着目し、近年の製品技術動向から要求される機能に対しての課題をまとめ、本研究の目的を述べた。

第2章では、可塑化完了後の樹脂の溶融状態を把握することを目的に、金型に射出する直前の樹脂の温度・密度・粘度のパラメータが均一かどうかを評価する方法を検討した。射出成形では、可塑化工程で樹脂が受けるせん断応力によるエンタルピの増加としてのエネルギー量が樹脂の溶融状態に影響すると考え、市販の高粘度の樹脂流動解析ソフトを用いて、スクリュ内の樹脂流動の可視化を試みた。その結果、スクリュの供給部で受けるエネルギー量が全体の約半分を占めてい

ることが明らかとなった。また、計量ストロークが大きくなることで樹脂が受けるエネルギーの差が大きくなることが明らかとなった。また、樹脂流動解析結果を踏まえて、実機による樹脂流動挙動の実証実験をおこなった。その結果、熔融近傍の温度よりも粘度の低い、高い樹脂温度の方がパージによる射出圧力のばらつきは小さいことがわかった。ストロークの長い条件を評価する際には射出時のショットごとのばらつきをみることで評価できるが、1ストローク中でのばらつきの評価には至らず今後の課題となった。

第3章では、可塑化後の1ストローク中における樹脂の熔融状態がどのような状態であるかを評価する手法を確立することを目的に、射出成形における可塑化工程中に成形機から得られるデータおよびノズル内の樹脂圧力の分析、ならびにシミュレーションから得られる結果の比較をおこなった。条件として、スクリュ回転速度を変化させて、樹脂がスクリュから受けるせん断応力によるエネルギー量の違いについて検討した。さらに熔融粘度に関係するスクリュ後退速度について着目し、第2章で評価した射出時の圧力とともに各条件が、スクリュ後退速度に与える影響についても検討した。その結果、回転速度が高速となると、可塑化工程におけるストローク後半においてスクリュの後退速度が上昇し難くなり、不安定な状態を示した。これは、高スクリュ回転速度となることで圧縮部付近において可塑化が不安定となっていることが要因であると考えられ、可塑化時のトルク値の傾向からも示唆された。また、チェックリング部での圧力損失を流動解析にて求めることにより、理想的な樹脂熔融状態でのスクリュの後退速度を算出することができた。スクリュの後退速度がばらつくことにより、スクリュ先端部での樹脂密度にも影響を及ぼすと考えられるが、理想的な樹脂後退速度と実際の後退速度を比較することにより、樹脂の状態が安定した状態にあるかを示した。特に、スクリュ回転速度 60rpm 時には理想的な状態で熔融されたと考えられ、一方で 100rpm 時には樹脂の状態が安定していなかったと示唆された。さらに、スクリュの後退速度のばらつきと射出時のノズル内の樹脂圧力には関係性がみられ、1ストローク中の樹脂の熔融状態のばらつきについて評価する手法が確立された。

第4章では、可塑化工程中のスクリュの後退挙動に着目し、これらから樹脂の熔融状態の均一性を評価できないか試みた。具体的には、1回の可塑化工程におけるスクリュ後退速度のばらつきの大きさを評価し、これらに影響を及ぼすパラメータを確認するとともに、ばらつきの低減へつながらる手法について検討した。その結果、スクリュの背圧を変化させた場合には、スクリュ回転速度 60rpm であり、背圧が低い場合において計量ストロークが 50mm を超える領域でばらつきが大きくなることが確認され、背圧が上昇するにつれ、ばらつきが低減することが確認された。一方で、計量ストロークが 50mm 以下の領域においては、背圧のばらつきへの影響は確認されなかった。また、回転速度が 100rpm の場合においては、背圧によるスクリュ後退速度のばらつきへの影響は確認されなかった。さらに、スクリュの供給部におけるシリンダ温度を上昇させた場合について検討したところ、スクリュの後退速度が安定する傾向にあることが確認された。その際の射出工程時のノズル内の圧力のばらつきを確認すると、後退速度のばらつきと関係性があることが確認され、スクリュの後退速度を安定させることが樹脂の均一な熔融を評価する指標となることが示唆された。

第5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ともに、射出成形における可塑化後の樹脂の熔融状態については把握することの重要性と今後の展望について述べ、本論文の締めくくりとした。