

博士學位論文

射出成形における樹脂溶融状態に関する研究

Study on resin melting state in injection molding

2022年

下楠園 壮

目次

第 1 章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	樹脂材料の可塑化装置について	3
1.3	射出成形機における可塑化工程後の課題	9
1.4	樹脂溶融状態の定量化に関するこれまでの研究	10
1.5	本研究の目的	18
1.6	本論文の構成	19
第 2 章	樹脂溶融状態の違いによる成形品へ及ぼす影響調査	20
2.1	緒言	20
2.2	流動解析	21
2.2.1	解析条件	21
2.2.2	粒子追跡法	22
2.2.3	可塑化工程におけるエネルギー解析結果と考察	23
2.2.4	スクリュ後退距離の違いによるエネルギー解析	24
2.2.5	シリンダ温度を変化させた場合の解析結果	26
2.3	実成形評価	26
2.3.1	実験装置および実験材料	26
2.3.2	評価方法	27
2.3.3	樹脂溶融状態の評価	27
2.3.4	ページによる樹脂溶融状態の評価	30
2.4	結言	33
第 3 章	流動解析を用いた樹脂溶融状態の評価手法の確立	34
3.1	緒言	34
3.2	実験方法	35
3.2.1	実験装置	35
3.2.2	スクリュ後退挙動の評価	35
3.2.3	チェックリング部通過時の圧力損失	36

3.2.4 理想的なスクリュ後退速度の算出	40
3.3 実験結果および考察	41
3.3.1 可塑化時のスクリュの後退速度測定	41
3.3.2 チェックリング通過時の圧力損失	44
3.3.3 理想的なスクリュ後退速度	46
3.4 結言	50
第4章 可塑化条件による溶融樹脂の状態評価と条件の最適化	51
4.1 緒言	51
4.2 実験装置および評価方法	51
4.2.1 実験材料.....	51
4.2.2 評価手法.....	52
4.3 背圧の影響評価	53
4.3.1 実験条件.....	53
4.3.2 実験結果および考察	53
4.4 スクリュ供給部ヒータ温度の影響評価	56
4.4.1 実験条件.....	56
4.4.2 実験結果および考察	56
4.5 結言	61
第5章 総括	62
5.1 本研究で得られた結論	62
5.2 今後の展望	64
参考文献	66
本論文に関する公表文献	73
謝辞	75

第1章 序論

1.1 はじめに [1]

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。このような工程が成形加工工程である [2]。成形加工の中で、特に多く使用される射出成形機について、工業化に必要な成形加工装置の起源は、Fig. 1-1 に示す 1872 年にアメリカの J. W. Hyatt がセルロイド用に開発した手動式の縦型射出成形機とされている [3]。この射出成形機は、加熱シリンダ内で樹脂を溶融させ、手動で溶融した樹脂を金型内へ射出充填し、冷却・固化した後に取り出す機構を有しており、成形加工装置の概念としては今日と変わらないものである。

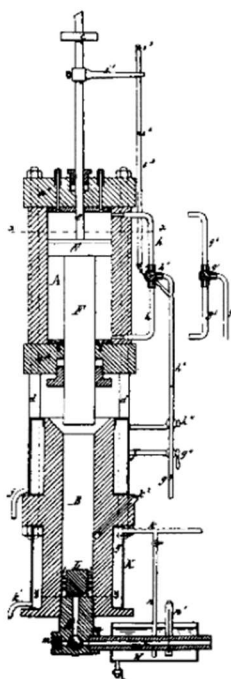


Fig. 1-1 Patent application of Hyatt's injection molding machine. [3]

射出成形加工装置の歴史は、石油化学の著しい発展により開発された樹脂材料と共にあり、その特性を活かし、有用な製品にするためのさまざまな成形加工法が開発されてきた。その中でも射出成形法は、3次元形状の付与が容易であることから、最も代表的な成形加工法として位置づけられている [4]。成形品の代表的なものとして、日用品をはじめ家電製品やOA機器、自動車部品、玩具、建材部品等が挙げられ、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。事実、Fig. 1-2に示す日本国内における成形加工装置の出荷台数の推移のように、製造される大半は射出成形機であり、常に8割を超えている [5]。これは、前述のように、射出成形が3次元の複雑形状品の加工が可能であることに加え、2次加工を必要とせず生産性やリサイクル性に優れ、最も合理的で高品質な樹脂成形品の大量生産に適した成形加工法であることに関係している。また、近年においては、射出成形を応用した成形加工法として、異種材料を型内で構成させるサンドイッチ成形や多色・異材質成形、フィルムシートや金属材料などと樹脂材料を複合化させるインサート成形、成形品内を中空にするガスアシスト成形、および熔融樹脂中に超臨界ガスを溶解させ金型内で発泡させる発泡成形、さらには金属粉と樹脂を混合させて成形した後、バインダーを脱脂・焼結することで金属成形品が得られるMIM成形 (Metal Injection Molding) などが開発され、その適用範囲が拡大している [6] [7] [8] [9] [10]。

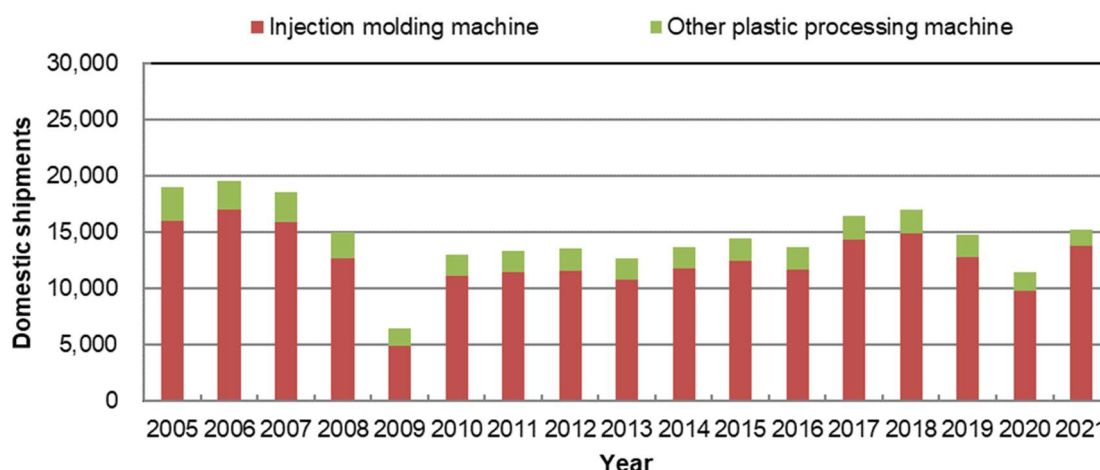


Fig. 1-2 Transition of Japan's domestic shipment figures for plastic processing machines. [5]

射出成形の適用範囲の拡大は、成形加工装置の進化により実現されてきたものであり、中でも樹脂材料の可塑化装置に関する技術進歩の影響は大きい。これは、射出成形法が原料である樹脂材料を可塑化し、金型内へ射出充填して目的の形状の製品を得ることを特徴とした加工方法であることに関する。中でも樹脂の可塑化工程は、成形性や成形品質を左右するため、その根幹をなす重要な技術となっている。生産性向上の観点においては、可塑化装置は樹脂を均質に可塑化溶解することが求められ、生産性向上のために 1930 年代に主流であった人力で駆動する射出成形機から、1950 年代には油圧駆動方式に代わり、全自動による連続成形が可能となった [11] [12]。その後、高度成長期に入り製品開発の競争が激化し、さらなる生産性向上と品質の安定性向上や精密成形の要求に対応するため、1983 年には電動サーボモーター駆動方式の電動式射出成形機が開発された。しかし、近年においては、成形品の高性能・機能化、高付加価値化に対する要求の高まりから、目的に応じて主原料にさまざまな添加剤や副資材が添加され、より均質な可塑化溶解をさせるための検討が必要となっている。

1.2 樹脂材料の可塑化装置について [1]

近年における樹脂材料の生産数量は、全体の 9 割以上が熱可塑性樹脂であることから、本論文においては、以下熱可塑性樹脂に限定して述べる。

射出成形機における可塑化装置は、起源とされる成形機 (Fig. 1-1) をはじめとし、その後 1940 年代頃まで、プランジャ方式と呼ばれる方式が用いられていた [3]。当初は、熱硬化性、熱可塑性樹脂共に、加熱シリンダと射出プランジャを組み合わせた単純な構成であった。しかし、成形機の自動化やハイサイクル化に伴い生産性が向上したことから、可塑化溶解を促進することが求められ、Fig. 1-3 に示すようなトーピードと呼ばれるレンコン状の断面を有した構成へと進化した [13]。プランジャ方式による樹脂の可塑化は、1 回の成形に必要な樹脂材料を計量装置から加熱シリンダへ移送し、溶解を促進するためプランジャにより樹脂は加圧され、加熱シリンダからの伝熱による熱エネルギーと、プランジャ内を流動する際に発生するせん断作用による機械的エネルギーが、固体樹脂に付与することで進行する。プランジャ方式の特徴は、構造が簡単で装置を安価に製造できることであるが、樹脂の混練と分散性に欠け、滞留部分が多く圧力損失が大きいことが課題であった。

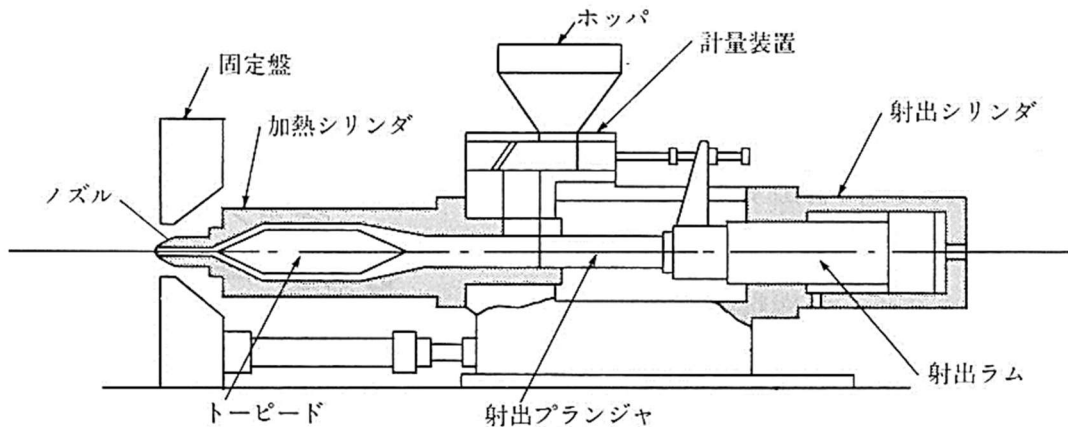


Fig. 1-3 Plunger plasticizing system for injection molding [13].

一方、スクリュを用いた可塑化装置は、ガッタパーチャと天然ゴムの成形加工に用いられた押出成形機が起源とされている [14]. 射出成形においては、1946年にアメリカの J. W. Hendry が開発したスクリュ式射出成形機が起源とされており [15], 今日においても、Fig. 1-4 に示すような螺旋状の溝を有するスクリュを用いた可塑化装置が射出成形機で広く用いられている. 構成としては、外周部よりヒータなどで加熱される筒状のシリンダ内に、スクリュと射出工程時の熔融樹脂の逆流を防止する逆流防止弁、ならびにシリンダ先端部には樹脂の吐出口であるノズルを備えている. 樹脂の可塑化は、固体樹脂ペレットがスクリュの回転により材料供給口からノズル側へ移送され、加熱されたシリンダからの伝熱による

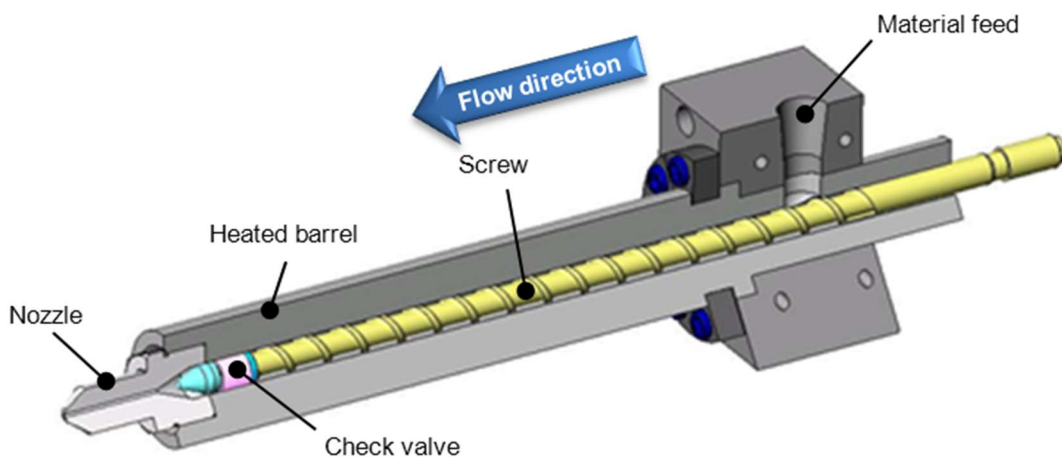


Fig. 1-4 Single-screw plasticizing system for injection molding machine.

熱エネルギーと、スクリュ回転による摩擦とせん断作用による機械的エネルギーが、移送された順に固体樹脂に効率よく付与することで進行する [15]。スクリュを用いた可塑化装置が開発されたことで、樹脂の混練と分散性の大幅な改善や樹脂の可塑化時間の短縮による生産性向上など、プランジャ方式で課題となっていた事項が概ね解消された。

そして、1950年代より成形加工の高度化が検討され始め、樹脂の可塑化現象を明確にするための検討が、射出成形に先行し押出成形を対象におこなわれた。ブラックボックス化されたシリンダ内の可塑化現象は、Maddock [16]やStreet [17]により、可塑化中にシリンダを急冷し樹脂を固化させた後、スクリュを引抜き、スクリュ溝内の固化した樹脂を解析する手法（以下、静的可視化実験）が提案された。静的可視化実験の結果を基に、Tadmor [18] [19] [20]らにより数式化された可塑化モデルを Fig. 1-5 に示す。これは、樹脂がスクリュ内でソリッドベッド（固体樹脂）、メルトフィルム、およびメルトプール（熔融樹脂）と3つの形態に分類され、樹脂の熔融可塑化の進行と共にソリッドベッド幅 X が減少していくことを示す可塑化モデルとして、最も一般的に用いられている。それ以降、様々な樹脂による実験解析が実施され、単軸スクリュ押出機に関してさまざまな熔融モデルが提案されてきたが [21] [22] [23] [24] [25] [26]、その多くは Tadmor モデルが基になっている。このモデルを基に、単軸スクリュにおける可視化実験がおこなわれ、固体から熔融に至る過程を3つの領域に分類して解析し、その過程に対応できる単軸スクリュの形状が検討されてきた [27] [28] [29] [30]。

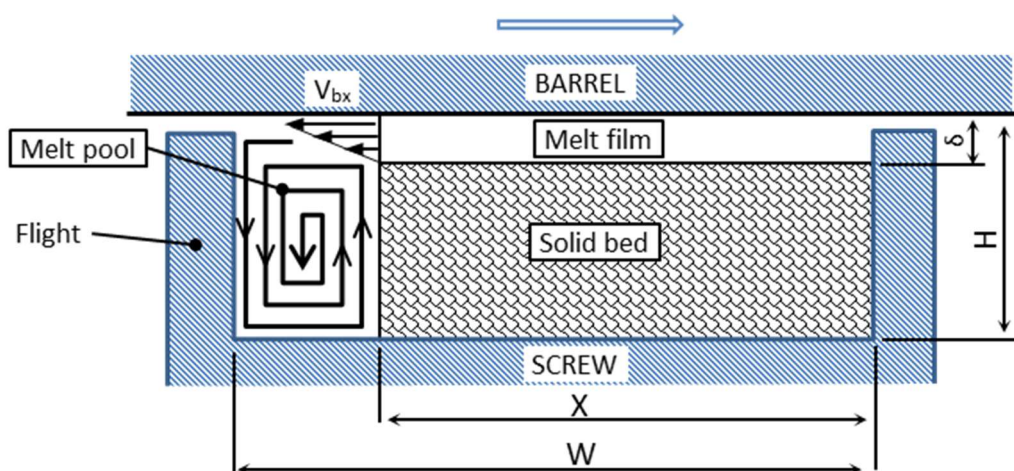


Fig. 1-5 Melting model for single-screw extruder (Tadmor). [18]

その後、射出成形においては、Fig. 1-6 に示すような供給ゾーン、圧縮ゾーン、計量ゾーンと、樹脂が固体から熔融に至る際の 3 つの形態に応じたセクションで構成されるスクリュ形状が用いられている [14]. 実際のスクリュ設計においては、スクリュ有効長 L に対するスクリュ直径 D の比率（以下 L/D とする）をはじめ、供給部と計量部の溝深さ比率（以下圧縮比とする）や各セクションの長さ比率、ならびにフライトピッチを設計変数とし、使用する樹脂に応じたスクリュ形状が設計されている。

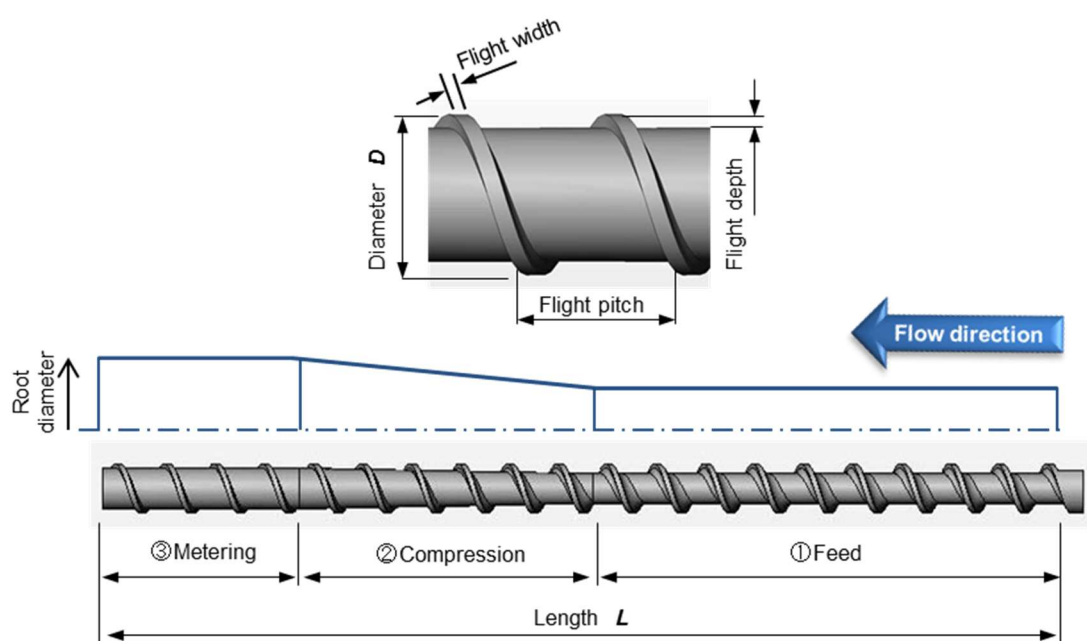


Fig. 1-6 Typical single-screw design.

以下に、スクリュの 3 つの各セクションにおける可塑化熔融メカニズムと、スクリュ構成の概要を示す。

① Feed zone（固体移送部）

ホッパより供給されたペレット状の固体樹脂が、スクリュ表面とバレル内面の接触部の摩擦抵抗により移送され、その過程でシリンダ内壁部側からの伝熱により樹脂の軟化が始まる。また、Feed 部の内圧が徐々に大きくなることで、ペレット間の空壁が圧縮されソリッドベッドが形成される。そのため、スクリュ形状としては、固体樹脂を

十分に供給できる一定の溝深さと熔融するまでに必要な熱を得るための十分な長さが必要となる。

② Compression zone (固体 - 熔融体移送部)

シリンダ内面側に接するソリッドベッドから順に熔融が始まり、シリンダ内面の表層にメルトフィルムが形成し、スクリュ回転による牽引流れによりメルトフィルムから流動した樹脂がメルトプールに滞留する。メルトプールによりソリッドベッドは変形し、ソリッドベッド幅 X が減少してメルトプールが増加することで、メルトフィルムの界面がシリンダ側へ移動する。これを繰り返す、固体樹脂が完全に熔融する。そのため、スクリュ形状は、フライト内の樹脂の嵩密度と熔融密度の違いから、フライト内を熔融樹脂で完全に満たすために、溝深さをテーパ状に徐々に浅くした形状となっている。

③ Metering zone (熔融体移送部)

完全熔融した樹脂を昇圧し、均質な熔融樹脂をノズル側へ安定して供給することを目的とするセクションである。そのため、スクリュ形状は、固体移送部よりも浅くした一定の溝深さを有しており、必要に応じて樹脂の混練性を向上させるための形状を設ける場合がある。

これら樹脂の熔融メカニズムに対するスクリュの構成や設計変数である各寸法は、成形加工に使用する樹脂や成形品、および生産性に応じて形状が設計されている [31]。これは、使用する樹脂の熔融温度や比熱がそれぞれ異なることに関係し、スクリュ内で固体樹脂を温度上昇させるための熱エネルギーに加え、熔融するための熱に変える機械的エネルギーが必要となるためである [31]。

ここで、射出成形機と同様の可塑化機構を有した押出成形機との成形加工プロセスの違いについて述べる。押出成形は、Fig. 1-4 と同様の単軸スクリュ可塑化装置を用い、常に一定の位置でスクリュが回転し樹脂を可塑化熔融させ、ダイスと呼ばれる金型から樹脂を連続で押し出し、必要な形状断面を有した連続体を得ることができる成形加工法である [32]。一方、射出成形においては、Fig. 1-7 に示す成形プロセスのように、スクリュ回転により樹脂を可塑化熔融させるが、所定量の可塑化をおこなった後にスクリュの回転を一時停止さ

せ、熔融樹脂を金型内に流動させる射出工程が必要となる。つまり、押出成形と射出成形における成形加工プロセスの最大の違いは、押出成形機は樹脂材料の可塑化を連続でおこなうことに対し、射出成形機では間欠でおこなうことである。

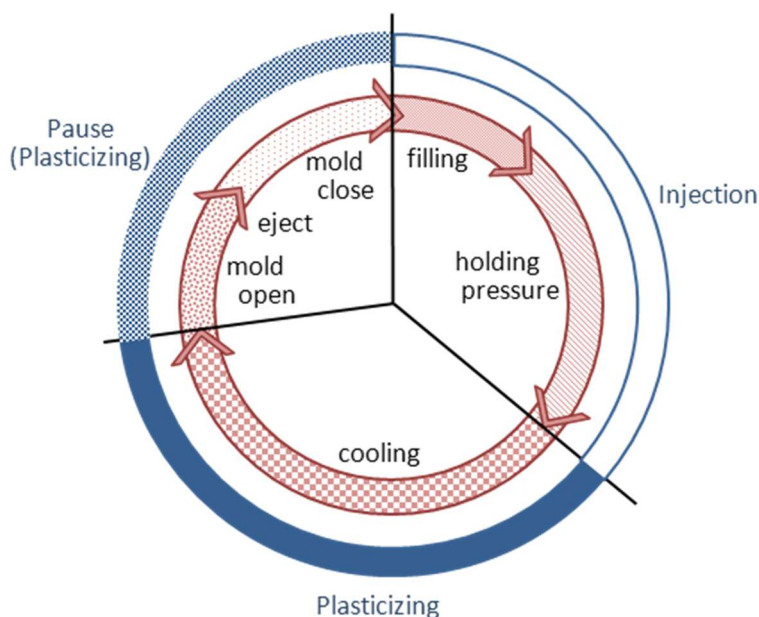


Fig. 1-7 Molding processes of an injection molding machine.

また、Fig. 1-8 に示すように、射出成形は成形品の容量に応じた樹脂を計量した後に射出動作をおこなうため、スクリュが所定の位置まで可塑化中に回転しながら軸方向に後退する。そのため、可塑化中のシリンダとスクリュの位置関係が相対的に変化し、スクリュへの材料供給位置が計量中に刻々と変化する。つまり、射出成形の可塑化工程は、材料が供給されてから熔融するまでに受ける熱履歴に差が生じることになる。したがって、可塑化現象を検討する上では、押出機は定常的な現象として取り扱うことができるが、射出成形は非定常な現象としての扱いが必要となる [33]。

これら射出成形の可塑化工程における非定常な現象は、均質な可塑化をおこなう上で大きな障害となり、可塑化完了後の樹脂の熔融状態にはばらつきが生じやすい状況となっている。

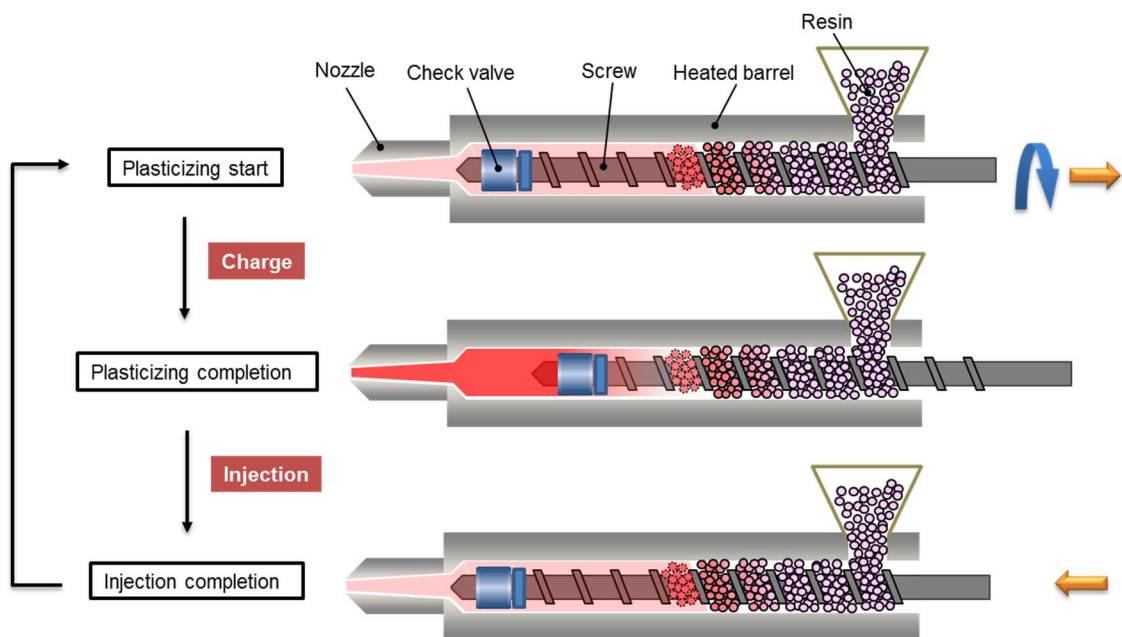


Fig. 1-8 Plasticization process flow for injection molding.

1.3 射出成形機における可塑化工程後の課題 [1]

目的の樹脂の熔融状態を得るためには、可塑化現象に対する本質を見極めることが重要である。例えば、射出成形は高温で熔融した高粘度流体を金型内に高速で流動させるため、反りや変形などの形状不良や、Fig. 1-9 に示すようなシルバーストリークやブリストアをはじめとした各種外観不良など、さまざまな成形不良が発生しやすい。これらの成形不良には対策の定石があり、その方法が書籍等で数多く示されてはいるが [31] [34] [35]、実際には対策を講じても完全に改善できない場合が多く、成形現場では日々試行錯誤を繰り返し対応している。これは、射出成形が成形機をはじめ、樹脂材料や金型、成形条件が多種多様であり、それらが複合的に作用していることに起因し、本質的な解決ができていないことを意味している。

その中でも、射出成形機における成形不良の発生要因は、可塑化工程に起因することが多いとされている [36] [37] [38]。これは、樹脂の可塑化装置がブラックボックス化されていることに加え、可塑化現象が過渡的であり、非定常な現象として捉え検討する必要があることに関係している。可塑化工程に起因する不良を大別すると、均質に熔融できない可塑化不

良と、樹脂の熱分解による不良となり、前者については充填不良をはじめ、外観不良や寸法不良、及び成形安定性が悪化する要因となる。後者においては、前者と同様の不良に加え、色相変化や分子量の低下、さらにはガス発生等による不具合の要因となる。そのため、射出成形機メーカーや部品メーカーでは、成形不良対策のためのスクリーン形状や可塑化システムの検討がおこなわれ、さまざまな対策商品が開発されてきた [39] [40] [41] [42]。特に近年においては、新興国の台頭によるプラスチック成形品の価格競争の激化や、要求精度が高まり、生産効率の向上による製品のコストダウンが生産現場で課題となる中、より一層の成形不良の低減が求められている。

このように、成形不良対策をはじめ、目的の可塑化をおこなうために、樹脂溶融現象の本質を見極めることが何よりも重要であり、体系的に検討手法を確立することが求められている。

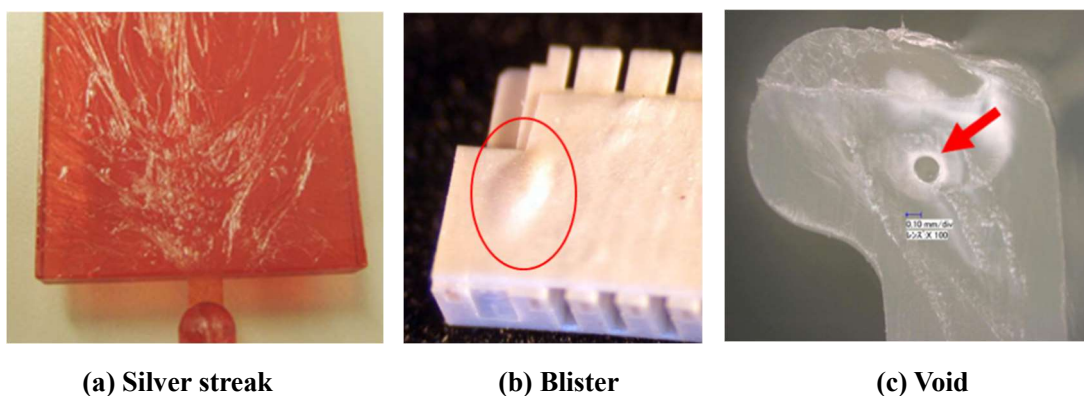


Fig. 1-9 Various types of molding defects in injection molding.

1.4 樹脂溶融状態の定量化に関するこれまでの研究 [1]

射出成形における樹脂溶融状態の検討に対し、以下の関係する研究がなされているが、未だ多くの課題が残されている。

1) 可視化実験解析による検討

樹脂溶融状態の検討において、ブラックボックス化されたシリンダ内での可塑化現

象を明確にする必要がある。これまで、シリンダ内の可塑化現象については、1.2項に示した3つのゾーンに分けたモデルが示されてきたが、静的可視化実験は、可塑化中の過渡的な現象を明確に捉えることが困難とされていた。その後、横井ら [43] [44] [45] により、Fig. 1-10, Fig. 1-11 に示すガラスインサート可視化シリンダ [46] を用いた動的可視化実験手法が確立され、過渡的な現象を含めた可塑化現象を、より明確に観察することが可能となった。そして、動的可視化観察をおこなうことで、静的可視化実験により提案されてきた各種溶融モデル [47] との関連性が明らかとなった。特に、動的可視化実験においては、可塑化中の圧力と温度の同時計測により、樹脂溶融過程の経時変化との相関解析が可能となり、スクリュ各部において可塑化モデルが異なることが示されている [48] [49]。これら可視化実験では、スクリュ内での樹脂溶融プロセスを明らかにするとともに、射出成形における可塑化の不安定現象の解明が目的であった。その結果、溶融が不十分なソリッドベットが溶融過程で途切れ、可塑化不良の要因とされるブレイクアップ現象の生成モデルが示された。しかし、これらの可視化実験による検討は、全て2次元における検討結果であり、ソリッドベットのスクリュ溝深さ方向については検討ができていない。つまり、3次元的に作用する樹脂の混練や分散作用に関する検討は、これら2次元での研究成果によるモデルだけでは全容を解明したとは言い難く、最終的な樹脂の溶融状態に対する検討には、未だ課題を残している。

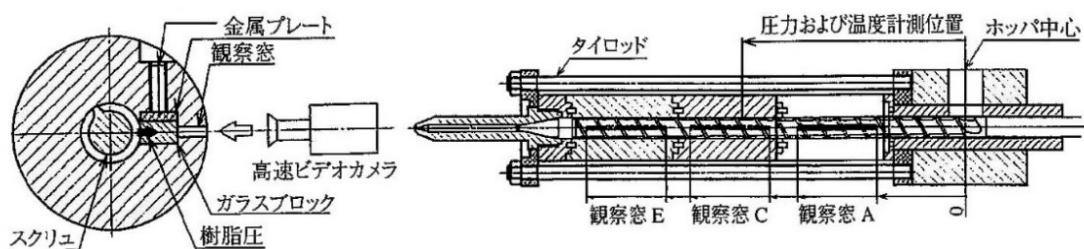


Fig. 1-10 Dynamic visualization measurement system. [46]

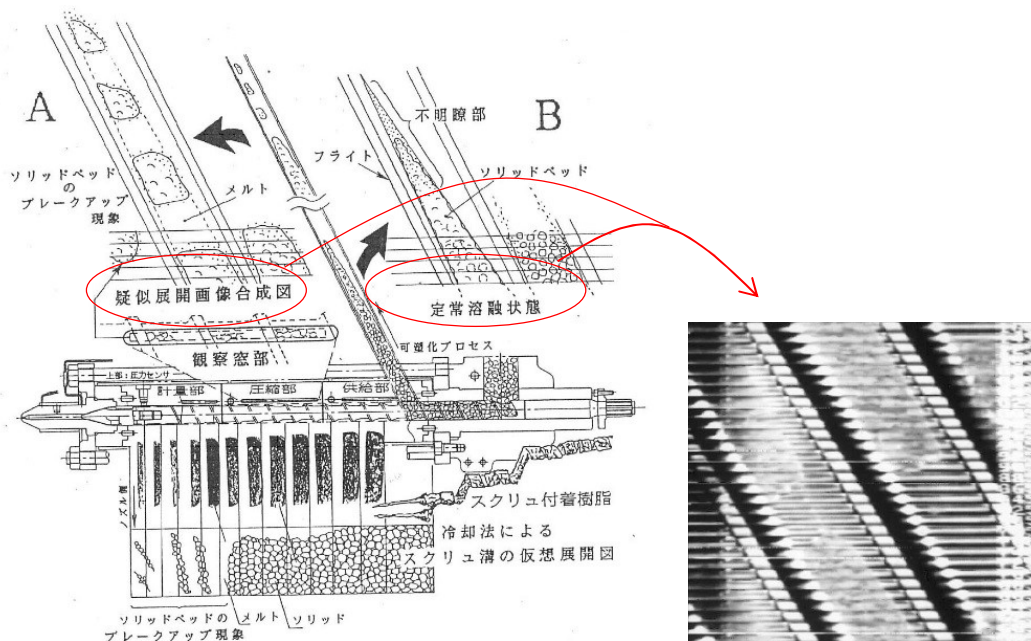


Fig. 1-11 Image analysis for dynamic visualization system. [46]

2) 数値解析による定量化検討

樹脂溶融状態の定量化において、品質工学を用いたロバスト設計をおこなうことが一つの手段として挙げられる。高橋ら [50] [51] [52]は、射出成形機用のスクリュー設計と可塑化条件に着目し、スクリュー形状の最適化を目的とした可塑化装置の評価方法を検討している。その中で、可塑化装置の基本機能として、スクリューの回転速度×時間と溶融樹脂量が比例関係であるとし、スクリュー圧縮比とスクリューピッチを制御因子として、両者の最適化がおこなわれている。しかし、基本機能に着目した上で関係する信号因子と制御因子、さらには誤差因子を整理して評価と最適化をおこなうため、限られた条件下における最適化検討には有効であるが、目的の可塑化現象に応じた形状の検討や、可塑化現象を定量的に捉えた評価をおこなう場合には、その適用に限度があると考えられる。つまり、品質工学を用いた最適化検討は、スクリュー形状の可塑化現象に対する影響因子を明確にすることには有効であるが、可塑化現象の本質を見極めた最適化検討に対し課題を残している。

一方、流動解析による最適化検討においては、実験的可視化解析に代わるシリンダ内

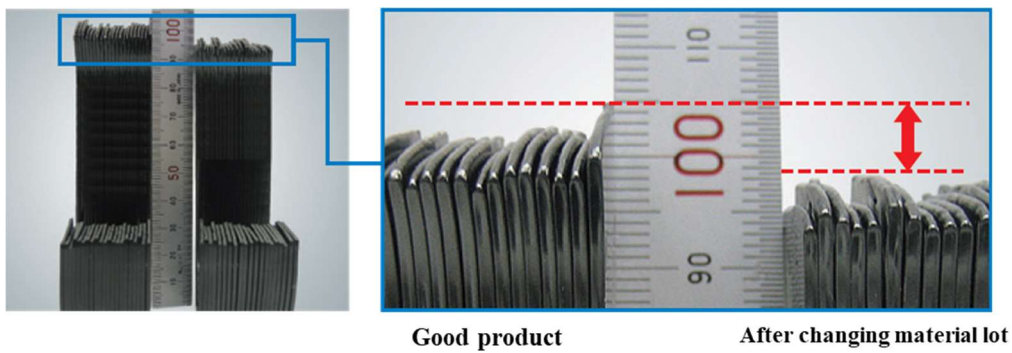
の可塑化解析手法として、粘弾性流体の流動解析による検討がおこなわれている [53] [54] [55] [56]. 最近では計算機能力の向上により、3次元のスクリュ形状に対しても計算が可能となっており [57] [58] [59], 実験結果に対して精度の高い計算結果が得られるとの報告が多数みられる [60] [61] [62]. これらの報告では、目的関数にせん断応力や温度、さらには圧力や速度などを用いることで、知り得たい情報の定式化に多くの自由度があるため、様々な樹脂の可塑化において目的に応じたスクリュ形状の最適化検討に有効な手段であると考えられる [63] [64]. しかし、流動解析による検討の多くは、押出機における特殊混練エレメント部や、二軸押出機のニーディングディスクセグメントの混練特性など、可塑化溶融モデルの検討から混練特性の評価をスクリュの一部分の要素技術で検討したものであり、スクリュ形状全体の最適化検討ではない。つまり、目的の可塑化溶融状態を得るための検討に対し、流動解析がどこまで適用できるかは明らかにされておらず、課題が残っている。

3) 成形条件自動化に向けた取り組み

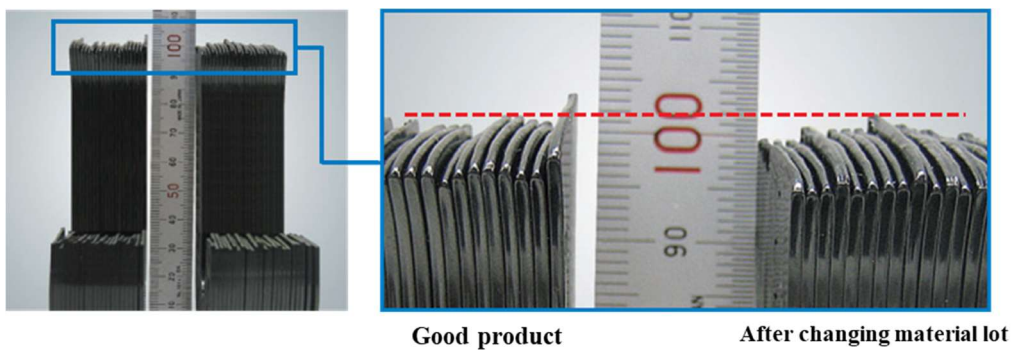
1.3 節にも示したが、射出成形においてはさまざまな成形不良が発生しやすく、それらに対し、対策が講じられている。近年、AI、IoT 技術の進展により、成形中に得られる情報をフィードバックし、成形条件を変更するシステムが検討されつつある。東洋機械金属(株)社においては、樹脂射出時の射出速度と射出圧を用いて、可塑化後の溶融樹脂の粘度を計算している。さらに、樹脂粘度が変動していた場合には自動でシリンダの温度調整をおこない、予め設定している樹脂粘度に合わせるシステムを開発している [65]. 例えば、Fig. 1-12 に示すような樹脂の流動性を確認する金型を用いて評価した事例が紹介されている。Fig. 1-13 (a)のように同じ樹脂種であっても、製造ロットが変更となった場合には、同じ成形条件で成形したとしても樹脂の流動長が異なることがある。この場合では、樹脂のロットが変化したことで流動長が短くなっている。そこで、予め良品基準となるデータを設定しておくことで、ロットが変更になる前の粘度状態に合わせるようにシリンダの温度を自動調整することで、Fig. 1-13(b)に示すように同等の流動長になるようにコントロールされることが示されている。これにより、成形品に発生するショートショットやヒケの低減につながる。また、この技術によりオペレータによる都度の条件入力が必要となり生産性向上につながる。



Fig. 1-12 Mold for flow test.



(a) Normal molding conditions.



(b) Molding with adjustment program.

Fig. 1-13 Resin viscosity automatic adjustment program. [66]

一方で世界に目を向けてみると、近年のこれらの解決策として ENGEL 社においては、材料品質や射出成形機の環境による変動を監視するシステムを開発している。均一な成形品重量を達成させるため、Fig. 1-14 に示すように金型に樹脂を射出する際に、基準となる射出ストロークと射出圧力の関係を記憶させておき、基準から変動した場合には成形条件を変更している。同じ射出ストローク位置であっても樹脂の状態によってはその時の射出圧力が変化する。また、この変化により充填のバランスが変化し、成形品の重量へと影響を与えている。そこで、これら変化がみられた場合には、射出速度を変更することによって金型内に流れる樹脂の流量を調整し、基準の関係に近くなるように調整をおこなっている [67]。また、射出成形の動作工程では Fig. 1-7 でも説明したように、成形品を金型内で冷却している際に、樹脂の可塑化がおこなわれる。樹脂の状態、スクリューの形状などによって可塑化時間は変化するが、安定した成形品を得るためには成形サイクルが常に同じであることが重要視される。可塑化時間が冷却時間よりも長くなった場合にはサイクルのコントロールができなくなってしまう。そこで可塑化時間を監視し、スクリュー回転速度を自動最適化することにより、冷却時間中に可塑化が安定しておこなえるように調整するシステムも開発している [68]。さらに、スクリュー回転速度のみでは調整が不可能であると判断された場合には、シリンダ温度や背圧の制御について変更すべきであるとの提案をする仕組みとなっている。

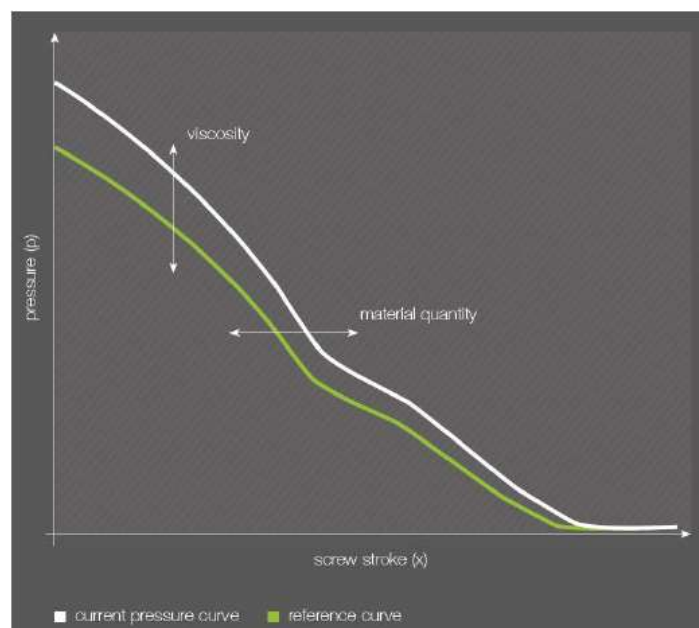


Fig. 1-14 Automatically compensating of process fluctuations system. [67]

Wittman Battenfeld 社では、樹脂射出時に得られる射出ストローク位置と射出圧力のデータにおいて、ある任意のストローク間において圧力の積分値を計算し監視している。この積分値において、異常な偏差が検出された場合には、そのデータをフィードバックし不良が生じないように条件を変更している。具体的には、ここでの積分値が大きくなった場合には、射出から保持圧力へ切り替えるポイント（VP 切替位置）を早くすることで金型内に充填される樹脂量を減らし、過充填となることを防ぐ。また、積分値が小さくなった場合には、VP 切替位置を遅くすることでショートショットなどになることを防いでいる（Fig. 1-15） [69]。

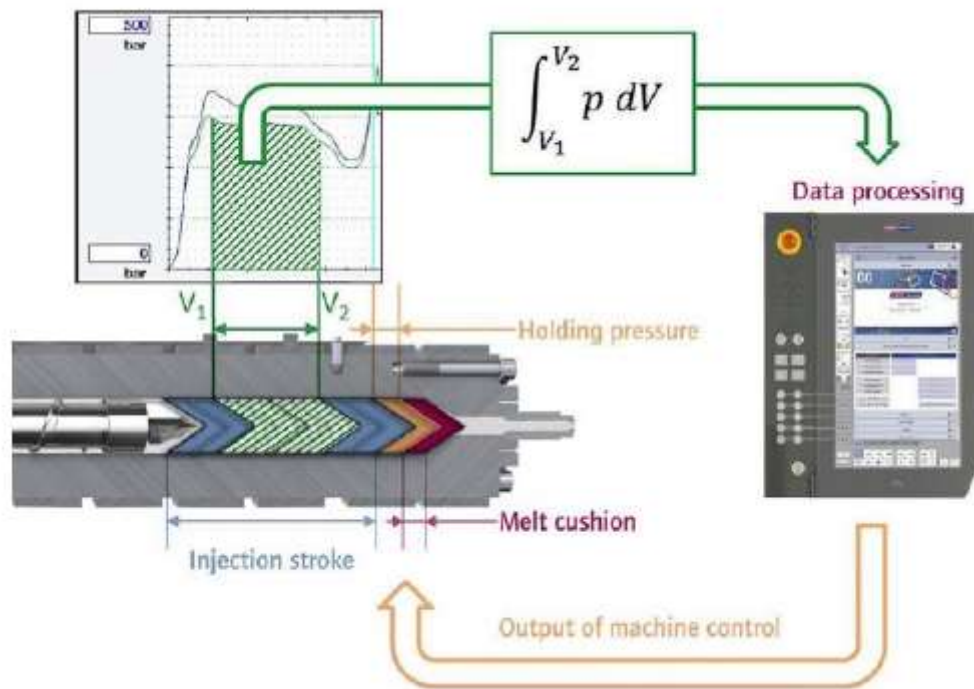


Fig. 1-15 Schematic diagram of material viscosity-driven injection control. [69]

Krauss Maffei 社においては、成形の安定性、精度、生産コストの低減を実現するため APC plus（APC：Adaptive Process Control）というシステムを開発している。このシステムでは、金型に樹脂を射出する際の圧力波形や、保圧時の金型内の圧力値を監視し、これらの圧力値から熔融樹脂の粘度を計測し、予測される射出量に基づいて、その

時のショットにおける VP 切替位置と保圧レベルを自動的に調整し、均一なショット重量を維持することができる。さらにはシリンダ内の溶融体の滞留時間を監視し均一な品質の確保をおこなっている。Fig. 1-16 に示す場合では、基準条件（青色線）に対し、樹脂粘度が高い材料を成形した場合に射出圧力値は上昇する（灰色線）。しかしながら、保圧時の圧力値は両者とも同じになっているため実際の充填量は樹脂流動性が悪く少なくなる懸念が生じる。そこで APC plus を用いることで VP 切替位置を調整し、充填量を増やすとともに保圧力を高めて調整している（黄色線）。

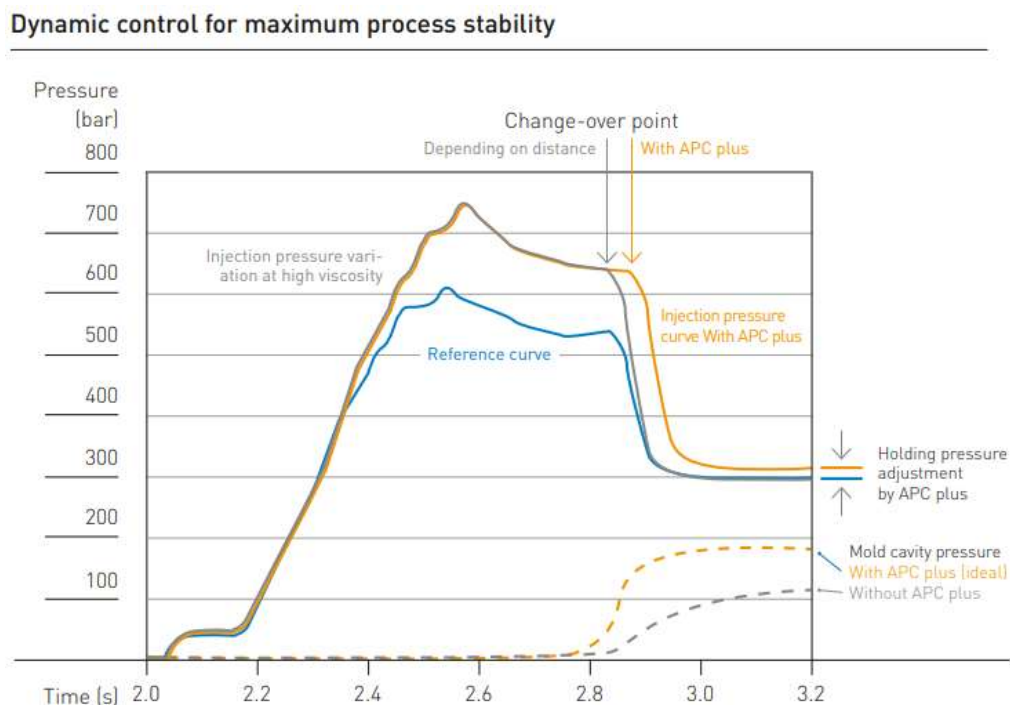


Fig. 1-16 Control system developed by Krauss Maffei. [70]

前述のように、連続した成形を実施する中での、成形の繰り返しの安定性に着目し、変化が生じた場合において、条件を自動的に変更することによる取り組みは多く存在している。しかし、樹脂の可塑化溶融状態を直接的に評価する検討はおこなわれていない。つまり、最適な成形品を得ることに対し、条件の影響は検討しなければならないが、樹脂の可塑化溶融状態が明らかにはなっておらず、具体的な現象解明に対し課題を残している。

1.5 本研究の目的

前節までに、射出成形機の可塑化装置が担う役割と重要性について、成形加工技術の歴史から、可塑化現象に関しておこなわれてきた研究の概要と課題を述べた。樹脂を可塑化溶解させるという観点においては、これまでにおこな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熔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。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熔融状態を成形機、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する。

以下に、本研究の具体的な目的を示す。

- 1) 可塑化完了後の樹脂の熔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すること。
- 2) 1 サイクル中の樹脂の熔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すること。
- 3) 熔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について検討すること。
- 4) 具体的に可塑化条件を変更した場合における、樹脂の熔融状態を評価し、一連の検討の妥当性を実証すること。

以上の目的を達成することで、これまで定量的に評価されていなかった樹脂の熔融状態を評価することが可能となり、可塑化条件の最適化手法を確立することにつながり、今後の成形加工の発展に寄与する技術になると考える。

1.6 本論文の構成

本論文は、本章である序論と総括を含めて全5章から構成される。以下に各章の概要を述べる。

本章では、前述のように、射出成形を中心に成形加工装置の変遷から、成形加工技術の進歩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、本論文の研究目的を示した。

第2章では、可塑化完了後の樹脂がどのような熔融状態にあるか評価することを試みた。射出成形においては、可塑化工程において可塑化条件の違いだけでなくスクリュが前後進するため、流動解析による粒子追跡法を用いたエネルギー計算や樹脂射出時の成形機から得られる情報をもとに熔融状態の違いを確認した。

第3章では、熔融状態の違いを定性的に評価し、均一な熔融状態を検討するため、可塑化工程時のスクリュの後退速度に着目した。検討に際しては、キャピラリーレオメータで測定した粘度データと流動解析にて算出したチェックリング近傍での圧力損失から理想的な後退速度を求めた。さらに理想的な後退速度と実際の後退速度との差を考察するとともに、射出時のノズル内での樹脂圧力のばらつきを比較することで、その関係性を検証した。

第4章では、第3章と同様に、定性的に表現した樹脂熔融状態を確認するため、可塑化条件との関係に着目し、スクリュの回転速度、背圧、シリンダ後部の設定温度に着目し実験検証をおこなった。また、得られた結果を基に、特に影響を及ぼす要因を明らかにし、樹脂熔融状態の均一化を試みた。

そして最後に、本論文の結論として各章で得られた結果を整理し、本研究を通じて得られた成果と知見についてまとめ、今後の可塑化技術の課題と展望を述べた。

第2章 樹脂溶融状態の違いによる成形品へ及ぼす影響調査

2.1 緒言

射出成形は、熱可塑性樹脂を成形する最も一般的な手法の1つである。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向上させるために非常に重要であると考えられる。

成形加工の研究は、射出成形よりも押出成形における樹脂の可塑化現象の研究が早くからおこなわれた。ブラックボックス化したシリンダ内での可塑化現象は、Maddock [16]とStreet [17]によって報告されている。可塑化工程中にシリンダを急冷させ、スクリュを引き抜くことでスクリュ溝内の固化した樹脂を分析する方法である。さらに、この実験結果に基づいてTadmorらによって可塑化モデルが定式化された [18] [19] [20]。最近では、横井ら [48] [49]が、シリンダや金型にガラス窓を取り付け、樹脂の挙動を視覚的に判断する方法を実施した。これにより、射出成形機での樹脂溶融モデルも押出機での溶融モデルと同様であることが証明された。さらに、Guerrierら [71]とGuptaら [72] [73]は、シリンダと金型に圧力センサと温度センサを取り付け、実験データをもとに数値解析おこない、樹脂の流動を予測した。これらの研究の結果、成形不良を減らすための技術がいくつか確立されてきた。しかし、完全な解決には至っていない。Chenら [74]は、射出成形における溶融樹脂の粘度が成形品にどのような影響を与えるかを報告している。可塑化完了時の樹脂の溶融状態は品質に大きく影響を与えるため、高品質の成形をおこなうためにはこの評価が重要である。射出成形において、可塑化完了後の樹脂の溶融状態を評価した研究はほとんどない。そこで、本章では、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。そして、流動解析で得られるエネルギーと比較をおこなった。

2.2 流動解析

本項では、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結果について述べる。

2.2.1 解析条件

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熔融状態に影響すると考えられる。そこで、樹脂の熔融状態を予測するため、POLYFLOW(ANSYS Inc. 製)を用いた流動解析を実施した。流動条件を以下の内容とした。

- ① 流体は非ニュートン流体とし、非圧縮性の等温とする。
- ② 高粘性流体のため流体への慣性力、重力の影響は無視する。
- ③ 流体は流路内に完全充満しているものとする。
- ④ 流体のスクリュ表面およびシリンダ表面での滑りはない。

この時、連続の式、運動方程式、および材料の構成方程式は、次式で示される。

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2-1)$$

$$-\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{f} = \rho \mathbf{a} \quad (2-2)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + \boldsymbol{\sigma}' = -p\mathbf{I} + \eta \mathbf{D} \quad (2-3)$$

ここで、 \mathbf{v} は速度ベクトル、 p [Pa]は圧力、 $\boldsymbol{\sigma}$ [Pa]は応力テンソル、 \mathbf{f} は体積力、 ρ [kg/m³]は密度、 \mathbf{a} [m/s²]は加速度、 \mathbf{I} は単位テンソル、 $\boldsymbol{\sigma}'$ は偏差応力テンソル、 η [Pa・s]はせん断粘度、 \mathbf{D} はひずみ速度テンソルである。

流体は、完全熔融したポリプロピレンを想定した。キャピラリーレオメータを用い、実際に本実験に用いるポリプロピレン樹脂 (J108M, 株プライムポリマー製) の 180℃, 200℃, 220℃におけるせん断速度とせん断粘度を測定した。流体のせん断速度依存性は、式 (2-4)

に示す Bird-Carreau モデルを用いた.

$$F(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 + \eta_{\infty})(1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2)^{\frac{n-1}{2}} \quad (2-4)$$

ここで, F はせん断粘度[Pa・s], η_{∞} [Pa・s]は ∞ せん断粘度, η_0 [Pa・s]はゼロせん断粘度, λ はべき乗則における時定数, $\dot{\gamma}$ [s⁻¹]はせん断速度, n はべき乗指数である. また, 解析における樹脂流量 Q [mm³/s]は, 実際の可塑化工程における樹脂の単位時間あたりの可塑化体積に相当するため, 実成形中における計量時間 t [s]を測定し, 式 (2-5) より樹脂流量 Q をそれぞれ求めた.

$$Q = \frac{\pi d^2 h}{4t} \quad (2-5)$$

ここで, d [mm]はシリンダ内径, h [mm]は射出ストローク, t [s]は計量時間である. Table 2-1 に各スクリュにおける樹脂流量 Q を示す.

Table 2-1 Volumetric flow rate in the flow channel of the storage temperature condition.

Temperature[°C]	Volumetric flow rate [mm ³ /s]
180	2083
200	2121
220	2106

2.2.2 粒子追跡法

本研究における解析は, 粒子追跡法を用いておこなった. 粒子追跡法は, 各粒子の流動場におけるせん断速度やせん断応力, および滞留時間など, シリンダの材料投入口から出口に至るまでの情報を得ることができる. これら情報から求められる平均値や累積値などの確率分布を得ることで, 実際の可塑化中におけるフライト形状に対する可塑化現象を多面的に定量化できると考え, 粒子追跡法による検討を試みた.

粒子の追跡は、2 ステップからなる空間二次精度のラグランジュ法を用いておこなった。あらかじめ有限要素法により流動場を求め、ラグランジュ法を用いた式(2-6)、及び(2-7)により粒子が移動する奇跡やせん断応力の履歴を記録した。

$$\text{第1ステップ} \quad x_i^{1/2} = x_i^0 + \frac{1}{2} u_i^0 \quad (2-6)$$

$$\text{第2ステップ} \quad x_i^1 = x_i^{1/2} + \Delta t \left(u_i^{1/2} - \frac{1}{2} u_i^0 \right) \quad (2-7)$$

ここで、 x_i は粒子の位置、 u_i は速度ベクトル、 Δt は時間刻みである。本研究では、時間 $t=0$ において流入口からランダムに 1000 個の粒子を 30 秒間流入させ、スクリュ内での流動に対しての移動を追跡することにより、各粒子の座標とひずみ速度、および応力の履歴をそれぞれ記録した。可塑化中に樹脂が受けるエネルギー量を式 (2-8) を用いて算出し、この値を樹脂の熔融状態の均一性を評価する 1 つの指標とした。

$$U = \int_0^{t_p} \tau \cdot \dot{\gamma} dt \quad (2-8)$$

ここで τ [Pa · s] はせん断応力、 t_p [s] は粒子の滞留時間である。

射出成形において可塑化工程中にスクリュは滑らかに後退するが、本解析においてはスクリュの後退位置を 0mm, 24mm, 48mm, 72mm と固定し、1 サイクルの断片的な状態として結果を得た。さらにスクリュの回転速度を固定し、シリンダ温度を 180°C, 200°C, 220°C と変化させた場合の解析も実施した。

2.2.3 可塑化工程におけるエネルギー解析結果と考察

樹脂がホッパに供給されスクリュ先端まで輸送される間に受けるトータルのエネルギーを流動解析にて算出した。その結果、粒子が流入から流出までに受けるエネルギーの平均値は 6.05MJ/m³であった。Fig. 2-1 に、スクリュの供給部・圧縮部・計量部のそれぞれの領域におけるエネルギーの平均値を示す。この図から、粒子がシリンダ内で受けるエネルギーは供給部で最も大きいことがわかる。式 (2-8) のように、粒子が受けるエネルギーはせん断応力が大

きくなると増加する。また、せん断応力はスクリュ形状やスクリュ回転速度に影響される。特にスクリュの溝が浅いことでせん断応力は大きくなる。したがって、通常、せん断応力は計量部で最も多くなることが予想される。しかし、本解析の結果では供給部でのエネルギーが最も高くなる。供給部の長さはスクリュ全体の約半分を占め、供給部での滞留時間は他の2ゾーンよりも長くなるためであると考えられる。また、本解析においては、流入部で樹脂が完全に溶融していると仮定としているが、実際には固体の状態で投入され、シリンダから熱を受けながらスクリュとシリンダの摩擦力によって前方に搬送される。溶融が始まると、樹脂が受けるエネルギーはせん断応力によるものに変化する。供給部においては樹脂粘度が高く、材料に加わるせん断応力は大きい。その結果、樹脂が受けるエネルギーは大幅に増加する。この現象から、供給部で樹脂がうける機械的エネルギーの比率は非常に大きくなる。つまり、スクリュ供給部の長さの影響が大きく、可塑化工程でスクリュが後退する挙動は供給部の長さの変化につながり、樹脂の可塑化・溶融に大きく影響を与えていると考えられる。

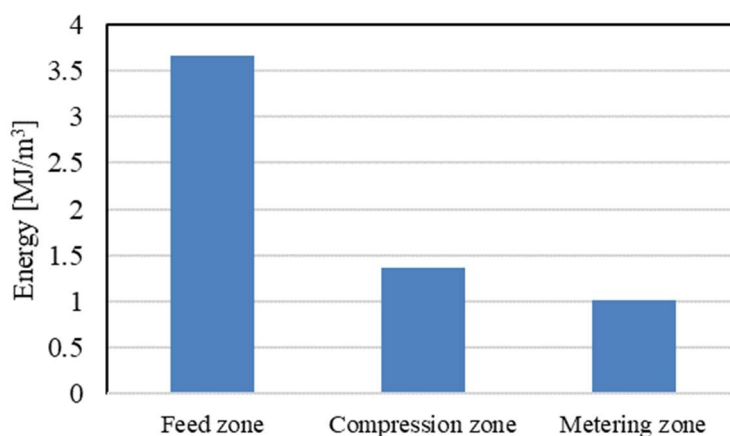


Fig. 2-1 Increase in energy within each zone.

2.2.4 スクリュ後退距離の違いによるエネルギー解析

可塑化工程においてスクリュが後退することを想定し、スクリュの長さを変化させ解析をおこなった。具体的にはスクリュが後退したと想定される距離分、解析モデルの供給部の長さを短くした。粒子追跡の結果を Fig. 2-2 に示す。横軸は各粒子が受けた機械的エネルギーの値、縦軸は粒子の割合を示す。この結果から、スクリュの後退距離が大きいことで、粒子

が受けるエネルギーが小さくなることが確認された。さらにスクリュの後退距離が大きいほど、エネルギーの分布が広がることが示された。つまり、実際の成形において、熔融樹脂の均一性にムラが生じることが予想された。Fig. 2-3 は各スクリュ長さにおけるエネルギーの平均値を示したものである。この図からスクリュの後退距離が大きくなると受けるエネルギーが減少することが改めて確認された。

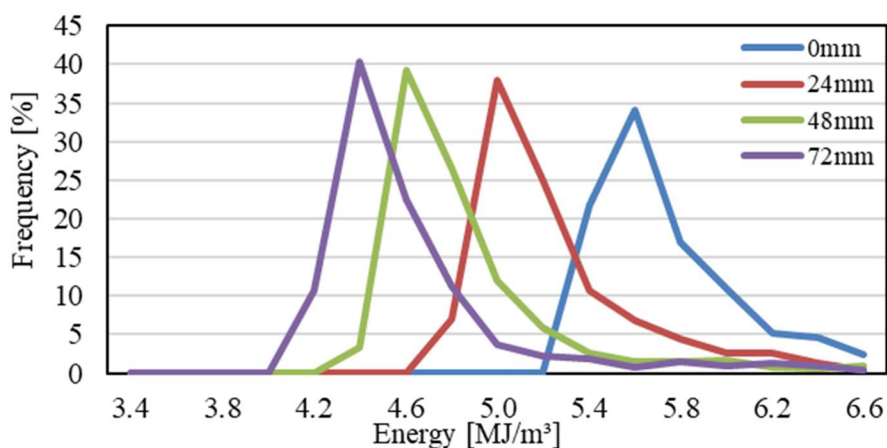


Fig. 2-2 Histogram of each retreat distance condition.

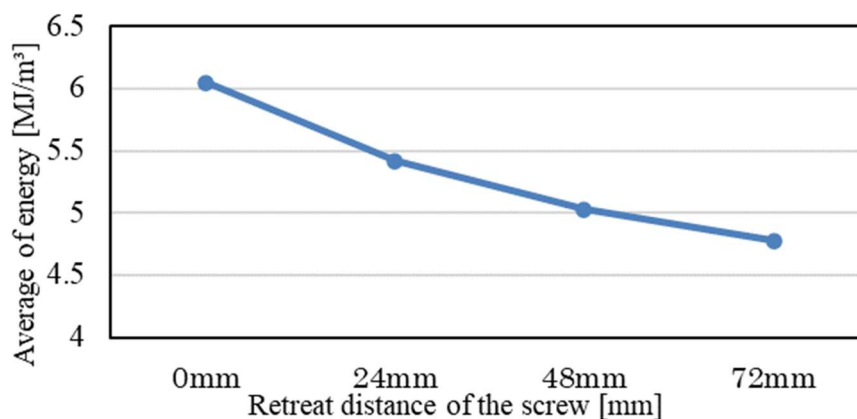


Fig. 2-3 Average energy value at each retreat distance condition.

2.2.5 シリンダ温度を変化させた場合の解析結果

スクリュ回転速度を 100rpm に固定し、樹脂温度を 180℃、200℃、220℃と変化させた場合のエネルギー量の差を Fig. 2-4 に示す。横軸にスクリュの後退距離、縦軸に後退距離 0mm を基準とした場合のエネルギーの減少量を示した。この結果から、樹脂温度が低いほどエネルギー量の差が大きくなることが確認された。また、後退距離が大きいほどエネルギー量の差が大きくなっていくことが確認された。この現象は、せん断応力によって樹脂が受ける機械的エネルギーが増加し、温度が低い樹脂ほどせん断応力による影響が大きくなるために生じたと考えられる。さらにスクリュ後退距離が大きいほど温度による影響の差が大きくなることも確認された。

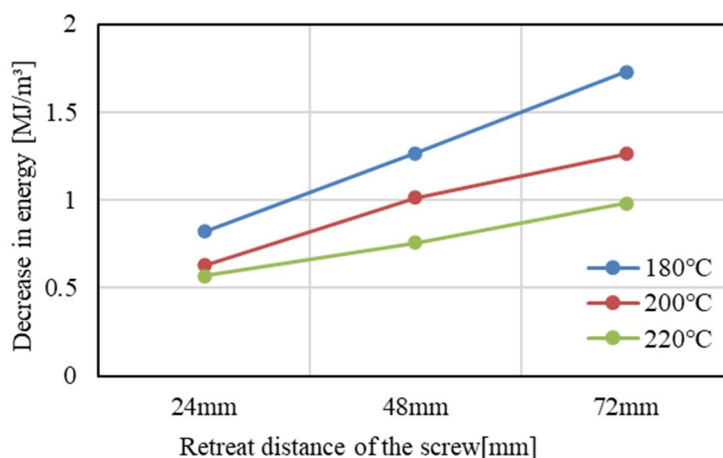


Fig. 2-4 Energy difference from the full-length screw at each retreat distance.

2.3 実成形評価

本項では、上述し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結果を述べる。

2.3.1 実験装置および実験材料

本実験には、型締力 40 トン、スクリュ径 24mm の電動射出成形機 (ET-40V, 東洋機械金属(株)製) を用いた。材料にはポリプロピレン (J108M, (株)プライムポリマー製) を用いた。金型は、計量ストロークによらず交換不要なスパイラル形状を使用した。成形サンプルの外観を Fig. 2-5 に示す。



Fig. 2-5 molding sample.

2.3.2 評価方法

試験片の成形条件を Table 2-2 に示す，成形は 1 条件について繰り返し 10 ショット実施し，その後計量ストロークとシリンダ温度を変更して，合計 6 条件について連続して実施した．そして，その時の最大射出圧力を記録し，その結果から樹脂の熔融状態の評価を試みた．

Table 2-2 Molding condition.

Screw rotation speed [rpm]	100		
Injection speed [mm/s]	10		
Back pressure [MPa]	5		
Metering stroke [mm]	24	48	72
Barrel temperature [°C]	180	200	220
Tool temperature [°C]	40		
Cooling time [sec]	25		

2.3.3 樹脂熔融状態の評価

実験で得られた 10 ショット分の最大圧力の平均値を Fig. 2-6 に示す．この図より，シリンダ温度，計量ストロークと最大射出圧力の関係性を評価した．結果として，シリンダ温度が高くなることで最大射出圧力は低下し，計量ストロークが大きくなることで最大射出圧力は上昇することが確認された．前者の要因は，シリンダ温度の上昇にともない，樹脂粘度が低下したためであると考えられる．また，後者の要因は，ストロークの増加により，金型内での樹脂の流動抵抗による圧力損失が大きくなったためであると考えられる．そこで，ショット毎の圧力の平均値のばらつきを 10 ショットの標準偏差を用いて算出した．

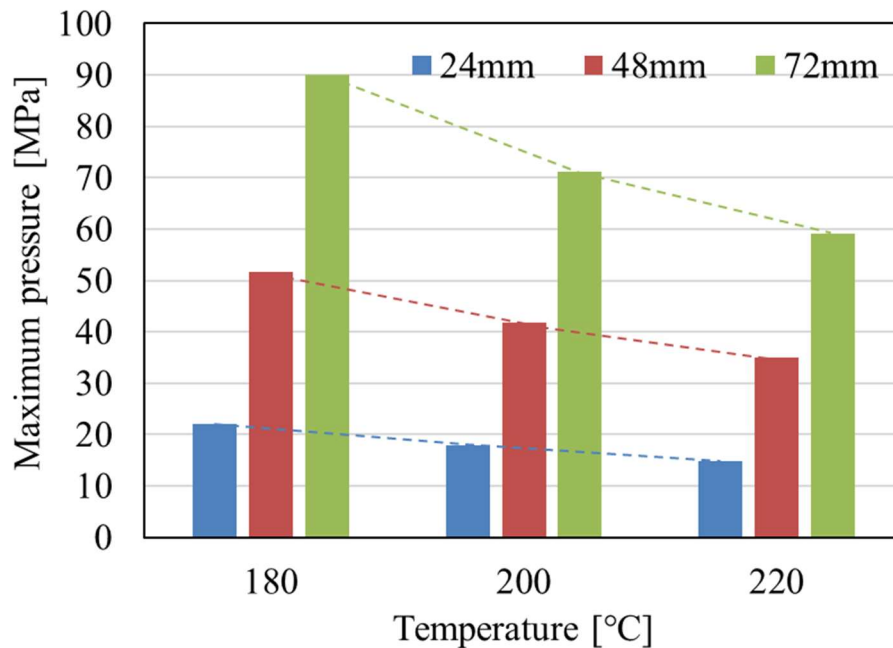
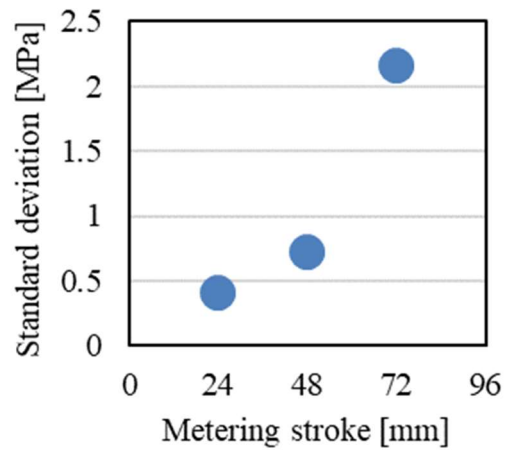
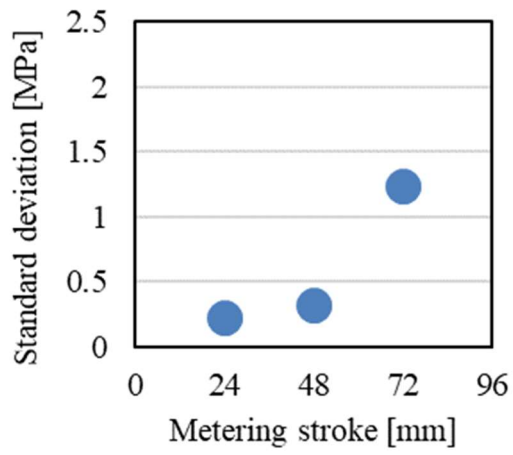


Fig. 2-6 Average maximum injection pressure with respect to the barrel temperature and metering stroke.

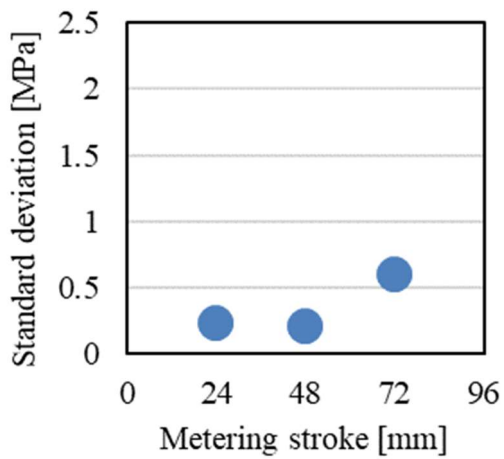
Fig. 2-7 に各シリンダ温度における最大射出圧力の標準偏差を示す。シリンダ温度が180°Cの場合、計量ストロークが大きくなるにつれて標準偏差が大きくなっていることがわかる。しかし、220°Cでは標準偏差の値が小さくなり、どの計量ストロークでも標準偏差がほぼ同程度となった。すなわち、シリンダ温度220°Cの場合には樹脂の熔融状態がストロークの大きさによらず安定していたと考えられる。この傾向は Fig. 2-4 に示す流動解析結果においても確認された。次にシリンダ温度が低い場合において標準偏差が大きくなったことについて考察する。計量ストロークを大きくすることで、一度に射出される樹脂の量は増加するためホッパから流入した樹脂が排出されるまでの滞留時間が短くなる。その結果、シリンダ温度が低い場合（熔融温度に近い条件）では、滞留時間の影響を大きく受けたことが要因と考えられる。流動解析においては滞留時間の考慮をしていないため、今後検討する必要があると考えられる。



(a) 180°C



(b) 200°C



(c) 220°C

Fig. 2-7 Deviation of the maximum injection molding pressure for each barrel temperature.

2.3.4 パージによる樹脂溶融状態の評価

金型に樹脂を射出した場合には、射出圧力は型内の流動長に影響されてしまうため樹脂の溶融状態を詳細にとらえるのには課題が残った。そこで、金型に射出するのではなく、計量した樹脂を空気中に射出（パージ）動作時の状態を確認することで評価できないか検討した。背圧は樹脂の溶融状態に大きく影響すると考え、Table 2-2 の条件にて射出前に金型にノズルをタッチさせた状態で規定の背圧をかけて計量動作をおこなった。さらにノズル内の圧力を測定するため、ノズル先端に圧力センサ（NP-465XL-1/2-20MPa, 日本ダイニスコ(株)製）を設置した。圧力は100msごとに測定し、圧力波形を描いた。1サイクルで得られた圧力波形を Fig. 2-8 に示す。圧力が上昇する箇所は2箇所であり、1つ目の圧力上昇は、計量動作時に発生し、設定背圧と同じ値を示す。2つ目の圧力上昇は、射出時に発生する。この射出時の圧力波形を条件ごとに描いた。温度ごとに計量ストローク違いでの圧力波形をまとめ Fig. 2-9 に示す。圧力波形には射出開始時から同時間における10ショット分の圧力の平均値を用いた。射出後の圧力挙動は、計量ストロークに関係なく同じであった。今回の実験では、樹脂の不均一性が波形の乱れに現れなかった。

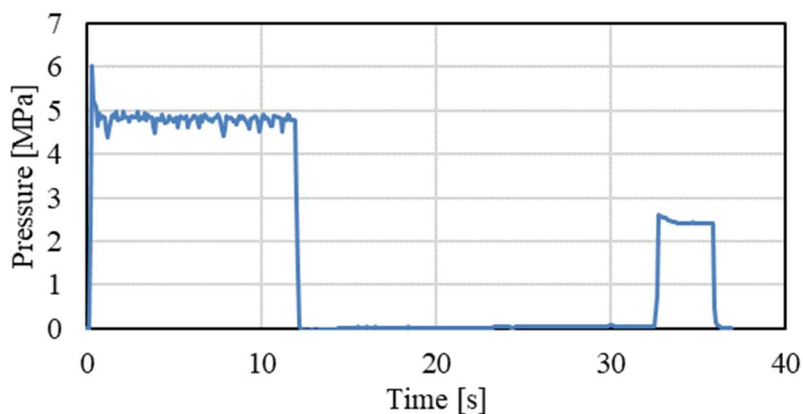
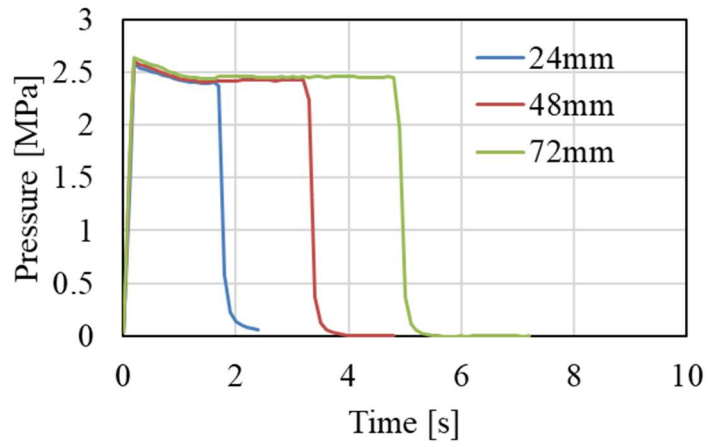
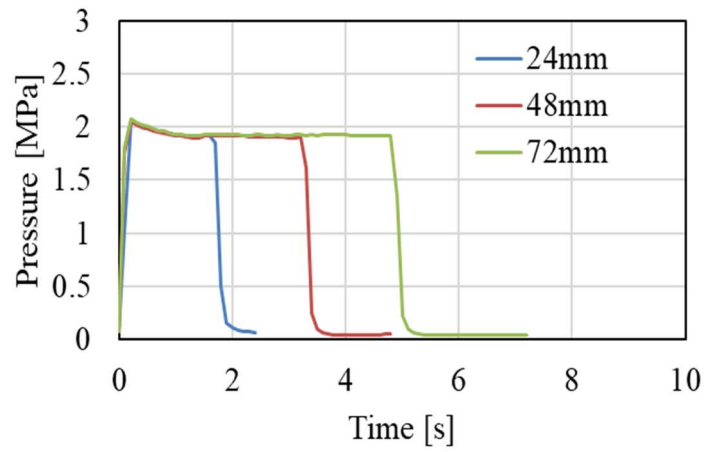


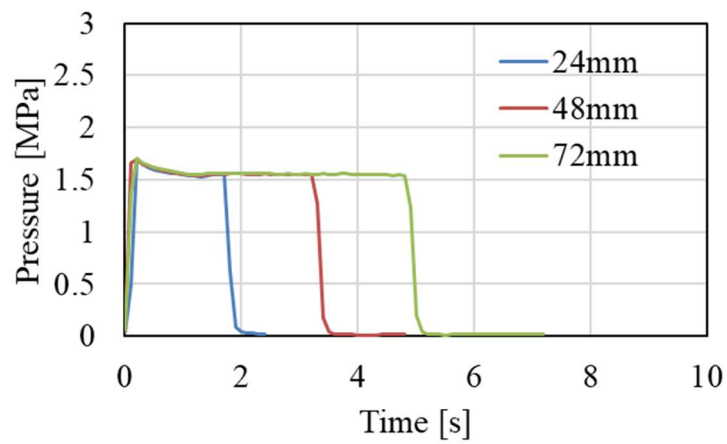
Fig. 2-8 Sample of the pressure waveform in a cycle.



(a) 180°C



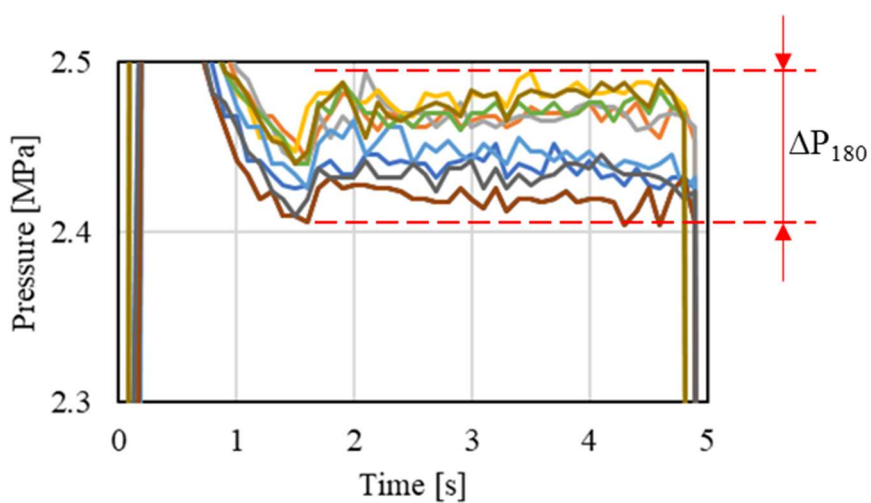
(b) 200°C



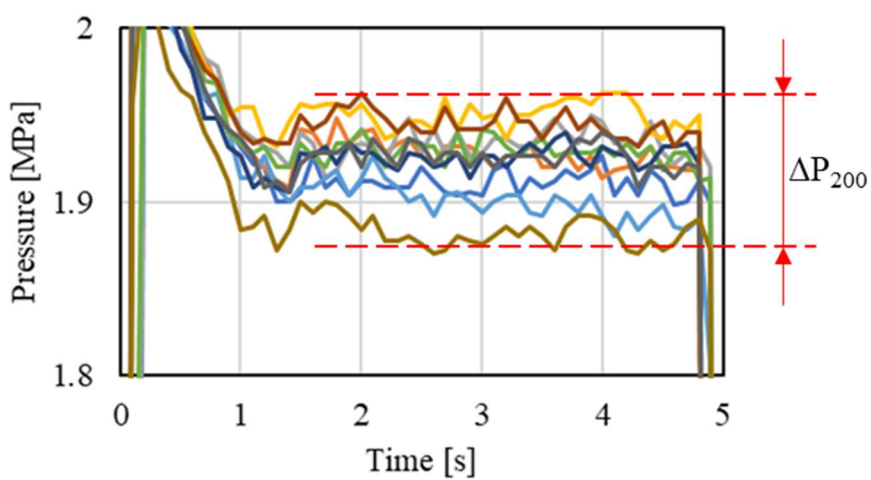
(c) 220°C

Fig. 2-9 Pressure waveform in the injection section.

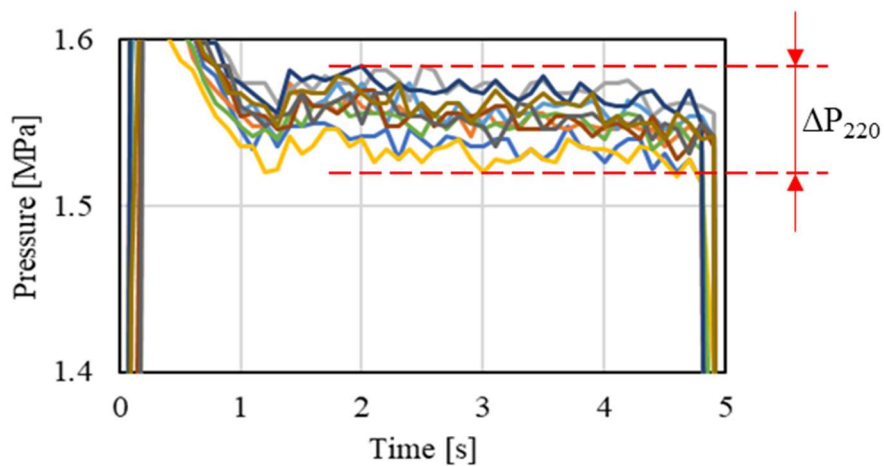
そこで、各温度における計量ストローク 72mm 時の 10 ショットのばらつきを評価した。10 ショットを重ね書きした結果を Fig. 2-10 に示す。10 ショットのばらつきの大きさを ΔP とすると、 $\Delta P_{180} > \Delta P_{200} > \Delta P_{220}$ となっておりシリンダ温度が上昇することでばらつきは低減していることがわかる。この結果は解析で得られた結果とよく一致している。今後ストロークの長い条件を評価する際には射出時のショットごとのばらつきをみることで評価できる。



(a) 180°C



(b) 200°C



(c) 220°C

Fig. 2-10 Results provided under conditions of 72 mm.

2.4 結言

本研究では、スクリュの長さの違いが熔融状態にどのような影響を与えるかの検証をおこなった。また、これにより金型に射出される直前の樹脂の熔融状態が均一であるかを評価する手法を確立することを目的とした。以下に結果をまとめる。

- 流動解析により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。
- 計量ストロークが大きくなることで最大射出圧力のショットごとのばらつきが大きくなる現象が確認された。
- 樹脂温度の違いによる結果から、熔融近傍の温度よりも樹脂粘度の低い、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。
- 1 サイクルごとの比較が可能となったが、1 サイクル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 流動解析を用いた樹脂溶融状態の評価手法の確立

3.1 緒言

射出成形は、熱可塑性樹脂を成形するための最も一般的な方法であり、他の方法と比較して、短いサイクルで複雑な形状を作るのに優れている。しかし、射出成形では、可塑化の不安定により樹脂の計量が安定せず、成形品にバリやショートが生じてしまう、あるいは可塑化の不良により、コールドスラグや発生したガスの巻き込みによるシルバーストリークなどが生じてしまうなど様々な成形不良が技術者を悩ませている。これらの不良は、多種多様な要因が複合的に作用しているため、根本的な解決は難しいとされてきた。また、その中でも樹脂の可塑化工程に起因するものが多いとされている [75]。理想的な溶融状態は、樹脂の粘度・温度・密度が均一であることであるが、可塑化工程では、シリンダ内の状態を視覚的に捉えられず、樹脂の溶融状態を正確に把握することは困難であった。射出成形の生産性を向上させるためには、可塑化工程において樹脂を均一に溶融できるよう考慮することが非常に重要である。

第2章では射出成形において可塑化量が増えること、すなわち、射出ストロークと樹脂温度の関係について検討し、樹脂の溶融状態がばらつく現象について述べた。しかし、可塑化後の樹脂の溶融状態のばらつきを具体的に評価した報告は少ない。成形が繰り返しおこなわれる中で、可塑化後の1サイクル中における樹脂の溶融状態のばらつきは成形品の品質に大きく関係するため、可塑化後の樹脂の溶融状態がどのような状態であるかを把握することが求められている。

そこで本章では、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、ならびに流動解析から得られる結果の比較をおこなうことにより、可塑化後の1サイクル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ことを目的とした。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。そのため、本章では解析において、せん断応力による樹脂の発熱を考慮した非等温解析をおこなった。また、溶融粘度に関係するスクリュ後退速度について着目し、前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検討した。

3.2 実験方法

3.2.1 実験装置

射出成形機は（ET40-HR，東洋機械金属(株)製）を用い，ノズル部には圧力センサ（NP465XL-1/2-20MPa，日本ダイニスコ(株)製）を取り付けられるようにした．可塑化部の概略図を Fig. 3-1 に示す．使用したスクリュは標準的なフルフライトスクリュで，その諸元を Table 3-1 Specifications of screw. に示す．使用した樹脂はポリプロピレン（W101，住友化学(株)製，以下 PP と記す）である．

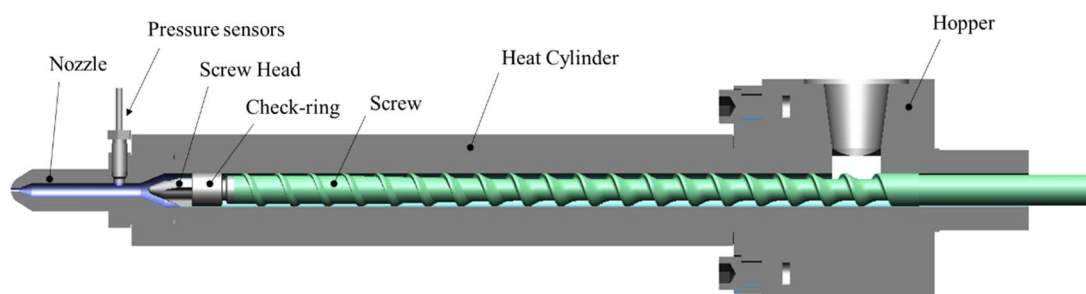


Fig. 3-1 Schematic diagram of plasticization parts.

Table 3-1 Specifications of screw.

	(mm)
Screw Diameter	φ24
Flight Pitch	24
Flight depth	2.0 (Metering), 4.9 (Feed)
Zone Length	84 (Metering), 120(Compression), 276(Feed)

3.2.2 スクリュ後退挙動の評価

射出成形における可塑化工程中のスクリュの後退速度を計測した．計測の際には，射出成形機に搭載されているスクリュの移動を検出するエンコーダーから出る信号を D/A 変換し，データロガー（NR-500，(株)キーエンス製）を用いてデータを採取した．また成形機の動作は，金型にノズルをタッチさせた状態で背圧をかけながら樹脂の可塑化をおこない，金型から

一定量ノズルを後退させたのちに、空中へ樹脂を射出する動作（パージ）を繰り返しおこなった。実験条件を Table 3-2 に示す。可塑化量は実験に用いた射出成形機の最大量である 43cc（計量ストローク 96mm）に設定し、スクリュ回転速度を変化させた。また、射出速度・背圧・加熱シリンダ温度は一定とした。さらに成形機の計量モータトルク値に関しても同様に測定をおこなった。

Table 3-2 Experimental conditions.

Screw rotation speed [rpm]	60	80	100
Cylinder temperature [°C]	170		
Injection speed [mm/sec]	15		
Back Pressure [MPa]	5		
Measuring stroke [mm]	96		

3.2.3 チェックリング部通過時の圧力損失

樹脂の熔融状態を評価する指標として粘度が挙げられる。しかしながら、粘度を直接的に測定する術はなく、測定するためには、キャピラリーレオメータのように任意の流路を通過する際のせん断応力・せん断速度から算出される。また、せん断応力を求める際には流路の流入口と流出口の圧力差（圧力損失）が必要となる。本研究では、射出成形機の可塑化時をキャピラリーレオメータに見立てて、射出成形時の可塑化中の樹脂粘度を樹脂の逆流防止を担う部品であるチェックリング部を通過する際の圧力損失から算出できると考えた。しかしながら、可塑化中にスクリュは後退するため、チェックリング前後で直接的な圧力を測定することは困難である。そこで、チェックリング部の理想的な圧力損失を求めるために、粘性・粘弾性流体解析ソフトウェア POLYFLOW(ANSYS Inc. 製)を用いて、チェックリング部における熔融樹脂の流動解析をおこなった。解析モデルの作成には Creo(PTC Inc. 製)を、メッシュの作成には Meshing(ANSYS Inc. 製)を用い、円管形状の流路モデル、およびチェックリング周辺部品に対しメッシュを生成した。解析に用いたモデルを Fig. 3-2 に示す。流動条件は以下のものとした [76]。

- ① 流体は非ニュートン流体で、非圧縮の非等温とする。
- ② 高粘性流体のため流体への重力の影響は無視する。
- ③ 流体は流路内で完全熔融しているものとする。
- ④ 流体と個体表面上には滑りはないものとする。

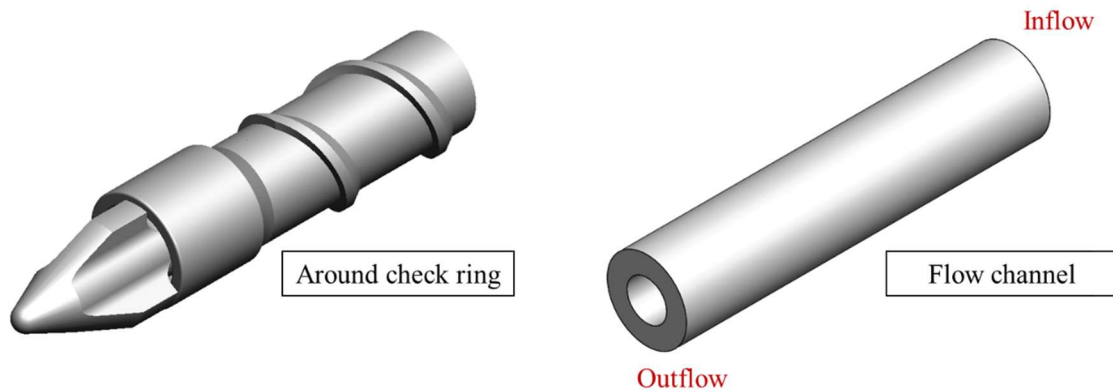


Fig. 3-2 Analysis model.

流体は完全熔融した PP を想定した。粘度データの算出する際に、流体のせん断速度依存性には式 (3-1) に示す Bird-carreau モデルを、流体の温度依存性については式 (3-2) に示す Arrheniusu モデルを用いた。

$$F(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})(1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2)^{\frac{n-1}{2}} \quad (3-1)$$

$$H(T) = \exp \left[\alpha \left(\frac{1}{T - T_0} - \frac{1}{T_{\alpha} - T_0} \right) \right] \quad (3-2)$$

ここで、 F はせん断粘度、 η_{∞} [Pa・s]は ∞ せん断粘度、 η_0 [Pa・s]はゼロせん断粘度、 λ はべき乗則における時定数、 $\dot{\gamma}$ [s⁻¹]はせん断速度、 n はべき乗指数、 α は活性化エネルギー比、 T_0 [°C]は絶対零度、 T_{α} [°C]は基準温度である。これらのモデルから式 (3-3) を用いて流体の温度依存粘度を定義した。

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = F(\dot{\gamma})H(T) \quad (3-3)$$

フィッティングした結果を Fig. 3-3 に示し、フィッティングに用いたパラメータを Table 3-3 示す。

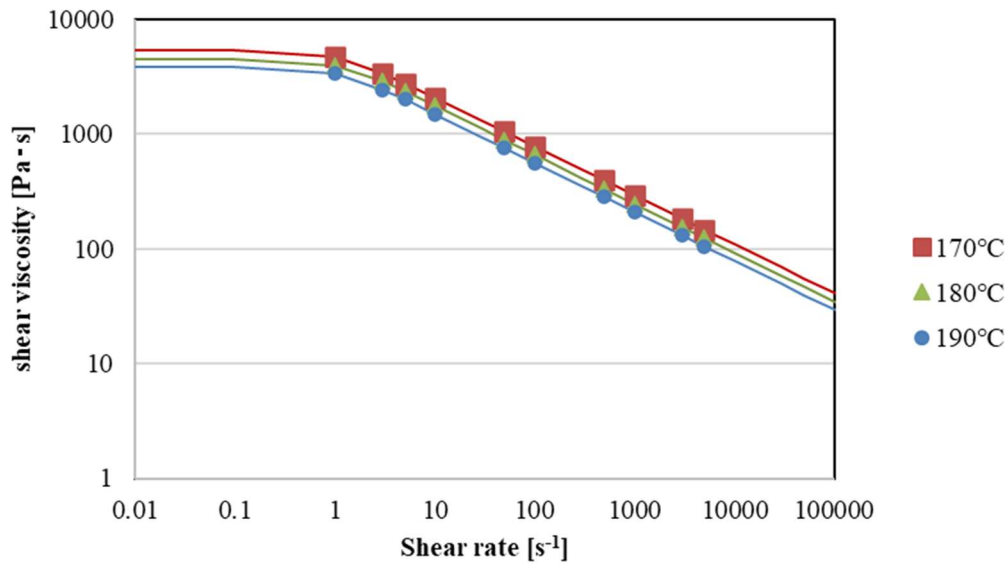


Fig. 3-3 Shear viscosity data of polypropylene.

Table 3-3 Fitting parameters for Bird-carreau model.

η_{∞}	η_0	λ	n
0.0006	3990.32	0.89	0.57

また本解析は非定常，非等温にておこなった．非等温をおこなった際の熱伝導方程式は式 (3-4) を用いた．

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = r - \nabla \cdot \mathbf{q} + \text{tr}(\sigma \mathbf{D}) \quad (3-4)$$

ここで， ρ [kg/m³]は密度， C_p [J/g・°C]は比熱， DT/Dt は温度の時間導関数， r [°C]は外部熱源により発生した熱， \mathbf{q} [W/m²]は熱流束， σ はコーシーの応力テンソル， \mathbf{D} は変形速度テンソルである．右辺第3項はせん断作用による発熱項である，

さらに解析条件は以下のものとした．

- ① 流量は常に一定とする．
- ② 流路表面での速度はゼロとする．

③ 流路出口での圧力はゼロとする。

流量 Q に関しては、式 (3-5) から実際に可塑化する際のスクリュ速度より算出した。

$$Q = vA = \frac{v\pi d^2}{4} \quad (3-5)$$

ここで、 v [mm/s]はスクリュ後退速度、 d [mm]はシリンダ内径である。Table 3-4 に各スクリュ回転速度時の流量 Q [mm³/s]を示す。また、物体の初期温度は 170℃とし、流体、スクリュ、シリンダの物性はそれぞれ 170℃におけるものを使用し、Table 3-5 に示す値を使用した。

解析結果を用いて、流路入り口から粒子を 1000 個流入させる粒子追跡をおこない、各粒子の軌跡や物理的なパラメータの値を記録した。粒子追跡法は 2 ステップからなる空間二次制度のラングランジュ方を用いた式 (3-6) 及び式 (3-7) により新しい位置に前進する。本解析では時間 $t=0$ において流路入り口からランダムな位置に粒子を同時に流入し、100 秒間追跡した。

$$\text{第 1 ステップ} \quad x_i^{1/2} = x_i^0 + \frac{1}{2}u_i^0 \quad (3-6)$$

$$\text{第 2 ステップ} \quad x_i^1 = x_i^{1/2} + \Delta t \left(u_i^{1/2} - \frac{1}{2}u_i^0 \right) \quad (3-7)$$

ここで、 x_i は粒子の位置、 u_i は速度ベクトル、 Δt は時間刻みである。これによりチェックリング入り口及び出口の圧力を算出し、その差から圧力損失を求めた。

Table 3-4 Volumetric flow rate.

Screw rotation speed [rpm]	Flow rate Q [mm ³ /s]
60	656.4
80	892.6
100	1199.0

Table 3-5 Physical properties of Fluids, Screw and Heat barrel.

	Density[kg/m ³]	Thermal conductivity[W/mK]	Specific heat[J/kg°C]
Fluid	900	0.125	1930
Screw	7800	41.9	481
Heat barrel	7800	41.9	481

3.2.4 理想的なスクリュ後退速度の算出

キャピラリーレオメータを用いて測定した粘度データは、均一に熔融した理想的な値である。また、算出されるせん断粘度、せん断速度およびせん断応力には式 (3-8) に示す関係性が成り立つ。

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3-8)$$

ここで、 η [Pa・s]はせん断粘度、 τ [Pa]はせん断応力、 $\dot{\gamma}$ [s⁻¹]はせん断速度である。さらに、せん断応力、せん断速度はそれぞれ式 (3-9) (3-10) から算出される。

$$\tau = \frac{P_c d_c}{4L_c} \quad (3-9)$$

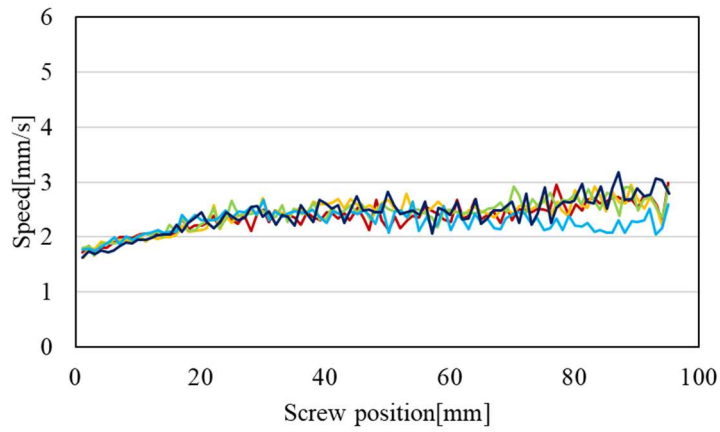
$$\dot{\gamma} = \frac{32Q}{\pi d^3} \quad (3-10)$$

ここで、 P_c [Pa]はキャピラリー長さに対する圧力損失、 d_c [mm]はキャピラリー内径、 L_c [mm]はキャピラリー長さ、 Q [mm³/s]は体積流量、 d [mm]はシリンダ内径である。これら関係より、流動解析によって求めたチェックリング部での圧力損失を用いて、チェックリング部通過時に発生するせん断応力を算出し、せん断速度へ換算した。これにより理想的な樹脂熔融状態での、可塑化時におけるスクリュの後退速度を算出した。

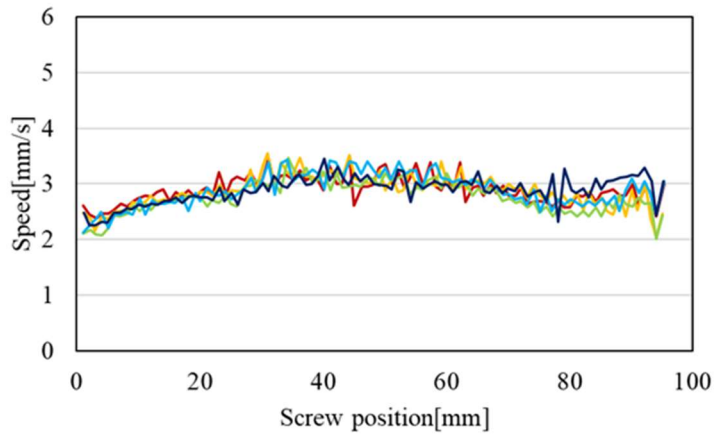
3.3 実験結果および考察

3.3.1 可塑化時のスクリュの後退速度測定

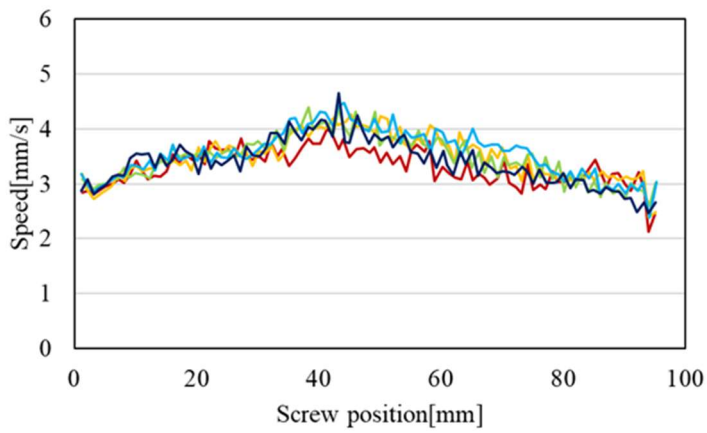
スクリュの回転速度ごとに可塑化時のスクリュの後退速度および計量モータトルク値を各5ショットずつ重ね書きしたものをそれぞれ Fig. 3-4, Fig. 3-5 に示す。これらの結果からスクリュの回転速度が一定にも関わらず、スクリュの後退速度とトルクが位置によって変動していることがわかる。これは、シリンダ内部での樹脂の状態が関係していると考えられる。射出動作完了直後においては、ホッパ下付近の樹脂は自由落下でのみの充填となるため疎である。そのため計量動作開始後は、スクリュの回転により樹脂が輸送されることで徐々に後退速度が上昇し、シリンダ内に完全に充滿した際に後退速度は安定したと考えられる。また、スクリュの下がり幅が 60mm を超えたあたりで回転速度によってスクリュの後退速度に違いが確認された。60rpm の場合においては後退速度が上昇する。これは新規に流入した樹脂ペレットがスクリュ表面を滑りやすく、送り効率が上がったためと考えられる。一方で、80rpm, 100rpm の場合には、スクリュの後退速度は低下する傾向にある。これは、樹脂ペレットの輸送速度が速く、樹脂に十分な熱が加わらず粘度が高い状態でスクリュの圧縮部へ流入したため、圧縮による変形に追従できず詰まりを起こしてしまっていたことが要因のひとつと考えられる。横井らは連続可塑化条件下においてホッパ下と加熱シリンダ内を可視化した報告 [77]をおこなっている。その中で、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を捉えている。可塑化工程、射出工程を繰り返した本実験の場合も同様の現象が生じていたと考えられる。さらに計量ストロークが 60mm を超えた領域でのトルク値に着目すると、60rpm の場合にはショット毎のばらつきはあるものの1サイクル中のばらつきは少ない。しかしながら、80rpm, 100rpm の場合にはトルク値が1サイクル中に上昇することも確認され、樹脂輸送の際に負荷が生じていることがわかる。スクリュ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。樹脂の熔融状態を均一な状態とするためには、スクリュの位置によって樹脂に与える熱量を変化させ、一定の後退速度で計量することが望ましいと考えられる。



(a) 60rpm

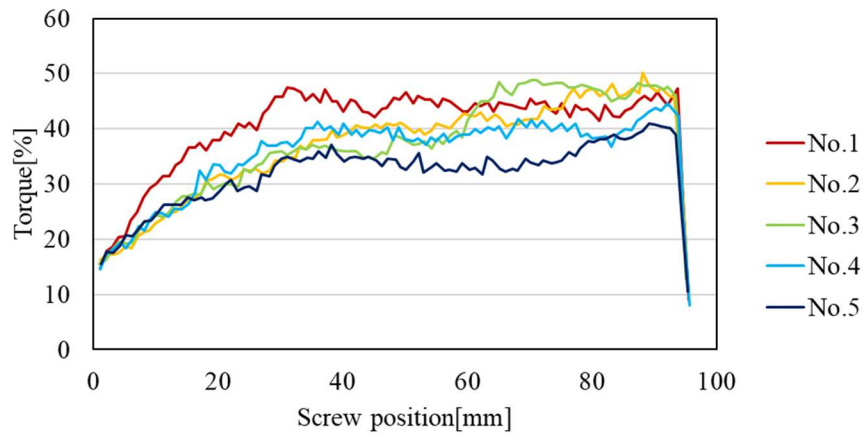


(b) 80rpm

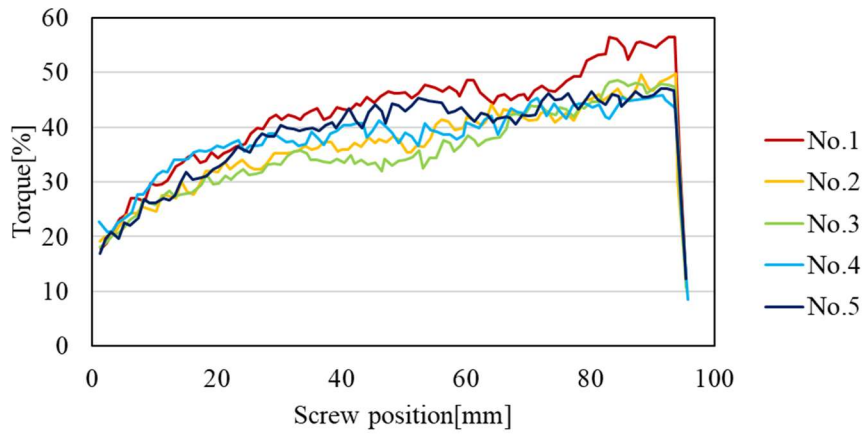


(c) 100rpm

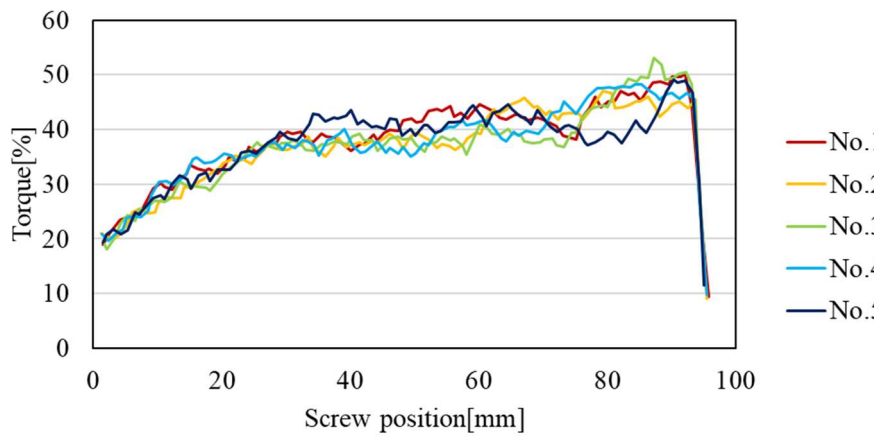
Fig. 3-4 Moving speed of screw at each position.



(a) 60rpm



(b) 80rpm

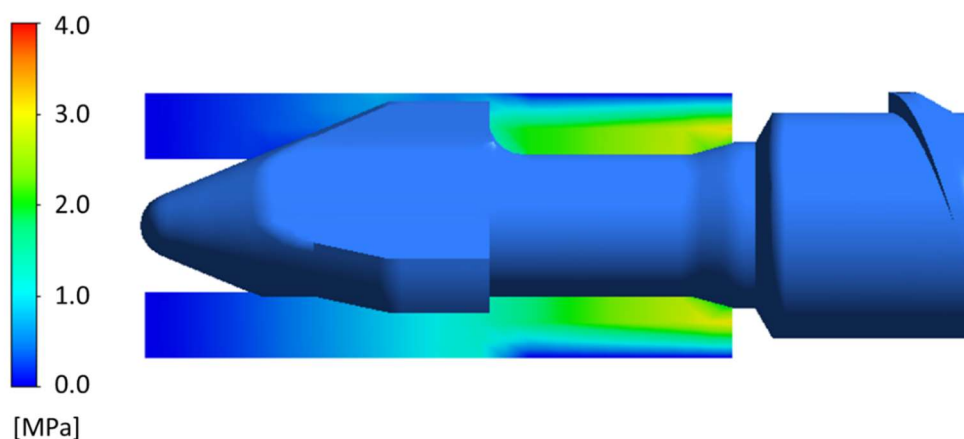


(c) 100rpm

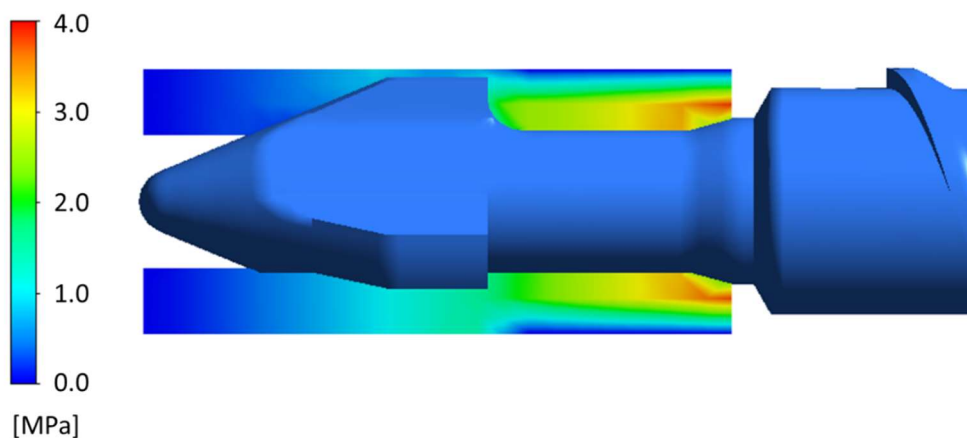
Fig. 3-5 Torque of plasticization motor at each screw.

3.3.2 チェックリング通過時の圧力損失

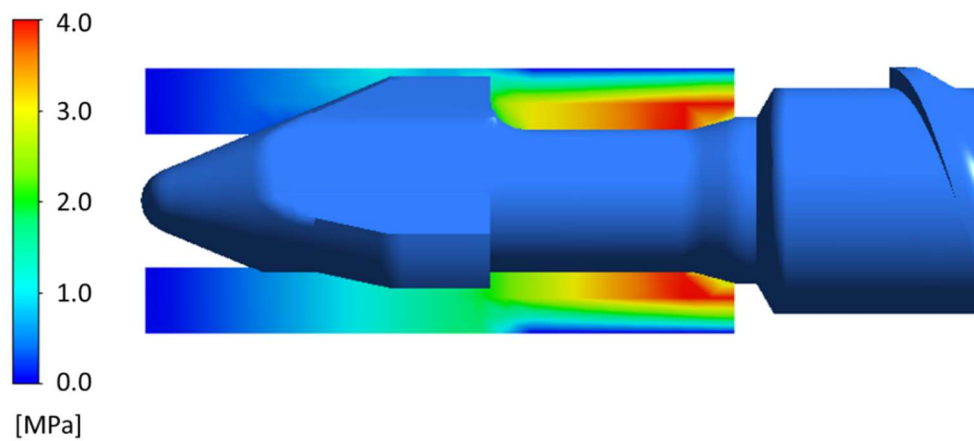
各スクリー回転速度条件における流動解析結果を Fig. 3-6 に示す。同図からチェックリング部を樹脂が流動する際に圧力損失が生じていることが確認された。さらに、粒子追跡を用いてチェックヘッド外径がストレートである領域の入口部と出口部での圧力の平均値を算出することにより、各回転速度時のチェックリング部での圧力損失を求めた。結果を Table 3-6 に示す。スクリー回転速度が増加、つまりは流量が増加することにより圧力損失が大きくなる結果となった。これは流路収縮による圧力損失や管摩擦による圧力損失の関係 [75]からも明らかである。



(a) 60rpm



(b) 80rpm



(c) 100rpm

Fig. 3-6 Pressure distribution around the check ring.

Table 3-6 Pressure loss around the check ring.

Screw rotation speed [rpm]	Pressure loss [MPa]
60	0.115
80	0.130
100	0.169

3.3.3 理想的なスクリュ後退速度

3.2 で算出したチェックリング部での圧力損失結果を用いて、各回転速度時のチェックリング部を通過する際に発生するせん断応力を求めた。結果を Table 3-7 に示す。また、この結果をもとに求めたせん断粘度、せん断速度の値も合わせて示す。これらからチェックリング部通過時の樹脂の流量を求め、理想的な熔融状態におけるスクリュの後退速度を求めた。結果を Table 3-8 に示す。また、この結果を実際の後退速度を示すグラフに重ね書きしたものを Fig. 3-7 に示す。スクリュ回転速度 60rpm の場合には、可塑化動作開始直後は後退速度が遅いものの、スクリュ位置 20mm からは実験で得られた値と流動解析で求めた値がほぼ同じであることがわかる。つまりスクリュ回転速度が 60rpm の時には、樹脂が理想的な状態で熔融し、輸送されたと考えられる。次に、スクリュ回転速度 80rpm の場合については、60rpm の時と同様にスクリュ位置 20mm あたりから流動解析で算出した後退速度と同じくらいの後退速度となる。しかしながら、60mm を超えてからはその速度から減速し、最終的に 0.5mm/s ほど遅くなっていることがわかる。0.5mm/s の速度差が生じるためには、粘度に換算すると約 200Pa・s 高くなっていると予測される。また、実際にこの領域においては計量モータトルク値が上昇していることから、スクリュ位置 60mm までは安定して熔融し輸送されていたが、可塑化工程後半になるにつれ、樹脂の熔融状態が悪くなり、粘度が上昇したことが考えられる。最後に、100rpm の場合には、すべての位置において流動

Table 3-7 Calculation results for shear stress, shear viscosity, and shear rate.

Screw rotation speed [rpm]	Shear stress [Pa]	Shear viscosity [Pa・s]	Shear rate [s^{-1}]
60	10898.4	3367.1	3.237
80	12319.9	3073.6	4.008
100	16015.9	2528.5	6.334

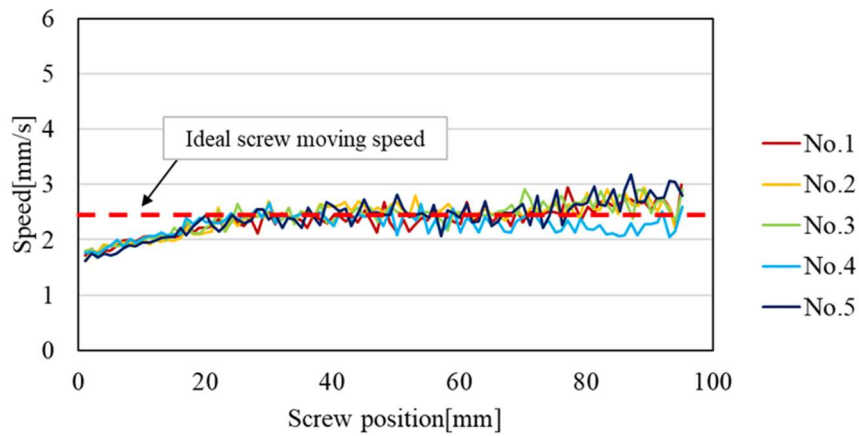
Table 3-8 Ideal screw moving speed.

Screw rotation speed [rpm]	Screw speed [mm/s]
60	2.577
80	3.159
100	5.008

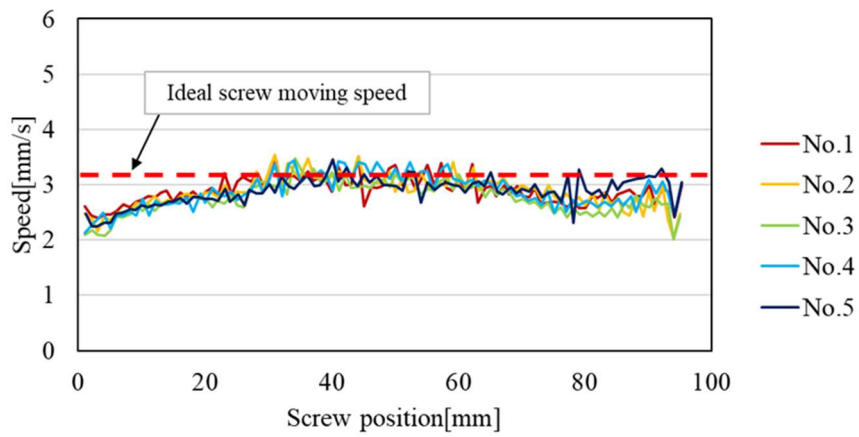
Table 3-9 Pressure in the nozzle during the plasticization process.

Screw rotation speed [rpm]	nozzle pressure [MPa]
60	4.01
80	4.26
100	3.52

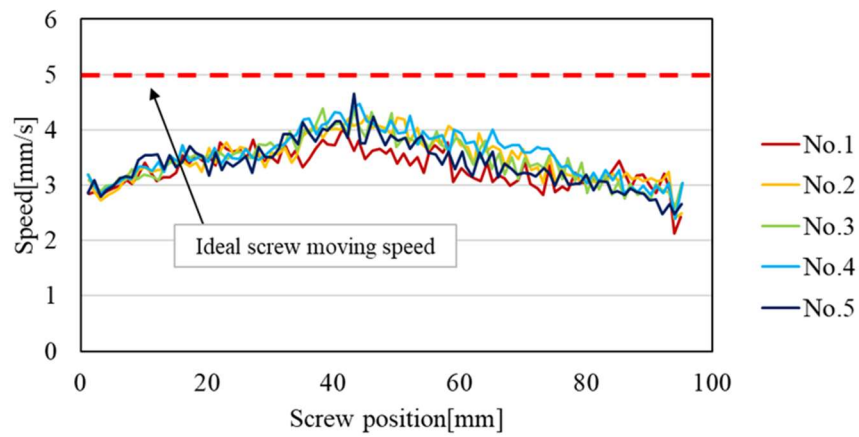
解析で求めた後退速度に実験値が達していないことがわかる。つまり、理想的な熔融状態ではなく樹脂の流動が悪くなっていると予測できる。この現象について、さらに追及するためノズルに装着している圧力センサで得た可塑化工程中の圧力の平均値をスクリュの回転速度ごとに求めた、結果を Table 3-9 に示す。比較すると 100rpm の時に低い値となっていることがわかる。射出成形機の背圧制御をおこなうロードセルは、スクリュ後方部のプレートに設置されているため、スクリュ溝内で樹脂の流動抵抗が大きくなると、ノズル圧が上昇する前にスクリュが後退してしまう。このことから回転速度が高い場合には樹脂の熔融が追い付かず流動が悪くなっていたと考えられる。このような状況では、未熔融の樹脂が成形品中に混入し、ショートやコールドスラグといった成形不具合につながることも懸念される。また、可塑化された樹脂が射出される時のノズル内での樹脂圧力を測定した。回転速度ごとに5ショットずつ重ねたものを Fig. 3-8 に示す。60rpm においては比較的安定した圧力変動となっているが、80rpm, 100rpm においてはスクリュの後退速度が低下した領域と同じく、ストロークの後半（図中 Measuring stroke : 0~40mm の範囲）において射出中の樹脂圧力が乱れていることがわかった。つまり可塑化された樹脂の熔融状態は、可塑化工程中のスクリュの後退速度のばらつきと連動して1サイクル中でばらついていることがわかった。



(a) 60rpm

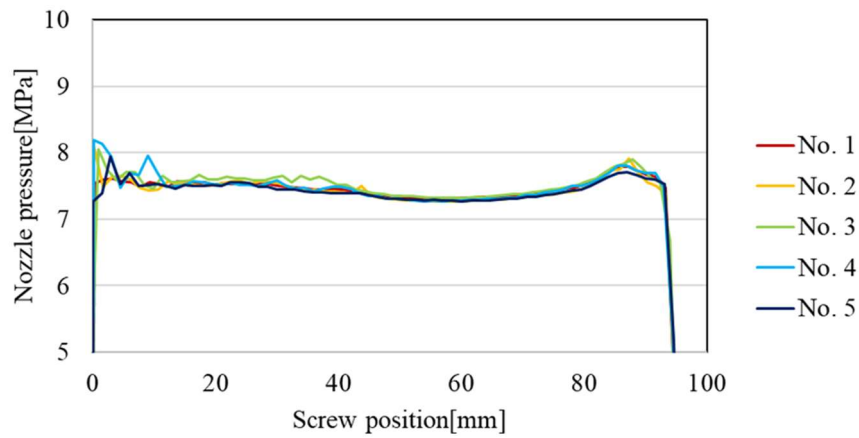


(b) 80rpm

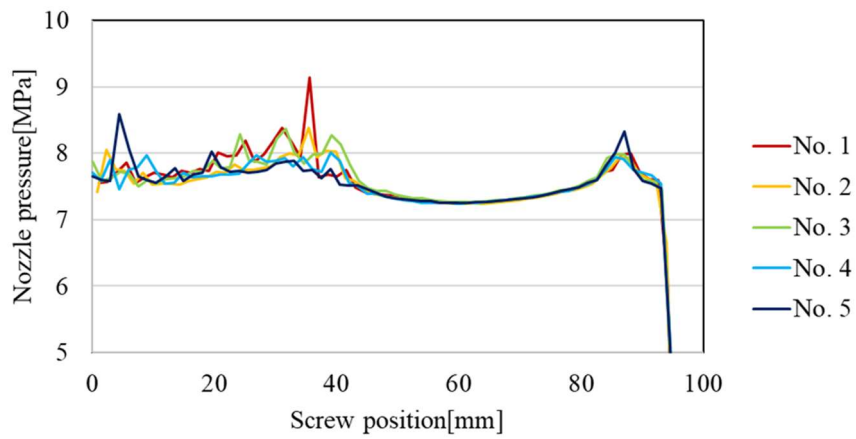


(c) 100rpm

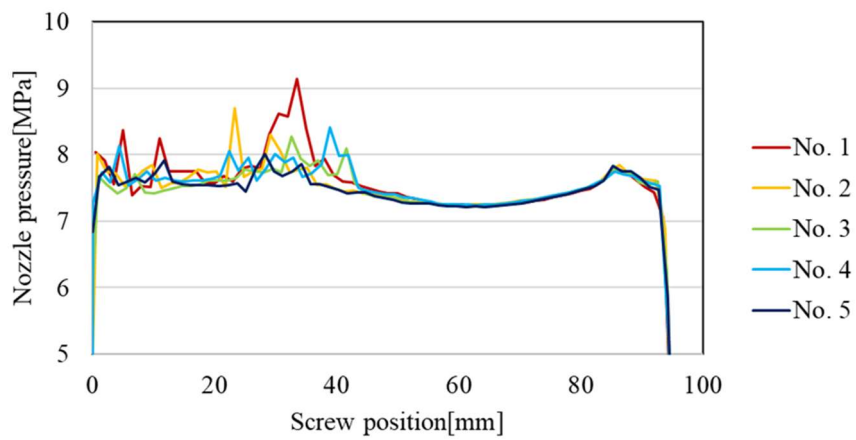
Fig. 3-7 Screw moving speed in ideal melt condition with experimental results.



(a) 60rpm



(b) 80rpm



(c) 100rpm

Fig. 3-8 Resin pressure in the nozzle during injection process.

3.4 結言

本研究は、射出成形における可塑化工程中の樹脂の熔融状態のばらつきについて、実験と流動解析により考察した。その結果を以下にまとめる。

- 1 サイクル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。
- スクリュの回転速度は、スクリュの後退に影響を及ぼすことを明らかにした。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。
- 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。
- 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、樹脂の熔融状態が安定した状態にあるか示した。
- スクリュ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た。

第4章 可塑化条件による熔融樹脂の状態評価と条件の最適化

4.1 緒言

熱可塑性樹脂の成形方法として、射出成形は、3次元の複雑形状品の加工が可能であることに加え、2次加工を必要とせず生産性やリサイクル性に優れることから最も一般的な方法として普及している。しかし、射出成形では、様々な成形不良が生じ技術者を悩ませている。これら成形不良は、多種多様な要因が複合的に作用しているため、根本的な解決は難しいとされてきた。射出成形においては、固体状態でホップに投入された樹脂材料(ペレット)が、加熱シリンダ内に設置されたスクリュの回転により、シリンダからの熱エネルギー、輸送時に発生するせん断エネルギーなどをうけ、熔融されながら輸送される。成形不良は、特にこの可塑化工程に起因するものが多いとされている [78]。理想的な熔融状態は、樹脂の粘度・温度・密度が均一であると考えられるが、加熱シリンダ内の状態を視覚的に捉えられず、樹脂の熔融状態を正確に把握することは困難であった。射出成形の生産性を向上させるためには、本工程において樹脂の熔融状態を管理することが非常に重要である。

前章までに、射出成形において樹脂の可塑化量が増加することにより、1回の可塑化工程中においても樹脂の状態がばらついている現象について報告および可塑化後の樹脂の熔融状態の評価手法について検討した。

本章においては、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る手法について検討した。

4.2 実験装置および評価方法

4.2.1 実験材料

射出成形機は可塑化部が水平の一般的な機械(ET40-HR, 東洋機械金属(株)製)を用いた。加熱シリンダにはバンドヒータがノズル部を含め4ゾーン巻かれている。また、ノズル部には圧力センサ(NP465XL-1/2-20MPa, 日本ダイニスコ(株)製)を取り付けられるようにし

た. 可塑化部の概略図を Fig. 4-1 に示す. また, 成形機に搭載されたスクリュの諸元を Table 4-1 に示す.

また, 試料には汎用的なポリプロピレン (NOBLEN W101, 住友化学(株)製; 固体密度 0.91g/cm³, メルトフローレート 9.0g/10min) を用いた.

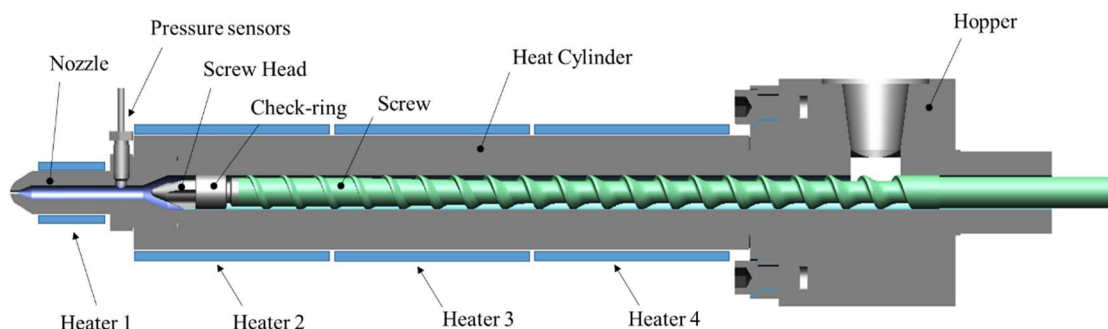


Fig. 4-1 Schematic diagram of plasticization parts.

Table 4-1 Specifications of screw.

	(mm)
Screw Diameter	φ24
Flight Pitch	24
Flight depth	2.0 (Metering), 4.9 (Feed)
Zone Length	84 (Metering), 120(Compression), 276(Feed)

4.2.2 評価手法

可塑化工程中のスクリュの後退挙動を把握するため, 射出成形機に搭載されているスクリュの位置を検出するエンコーダーから出る信号を D/A 変換し, データロガー(NR-500, 株キーエンス製)を用いてデータを採取した. さらに, 射出動作時のノズル内部での圧力変動を確認するため, ノズルに搭載した圧力センサから, 同様にデータロガーへ接続し連続的に採取した. 成形機の動作は, 金型にノズルをタッチさせた状態で, 規定の背圧をかけながら樹脂の可塑化をおこない, 可塑化完了後に金型からノズルを一定量後退させ, 空中へ樹脂を射出する動作 (ページ) を繰り返しおこなうものとした. 可塑化量は実験に用いた射出成形機の最大量である 43cc (計量ストローク 96mm) に設定した.

4.3 背圧の影響評価

4.3.1 実験条件

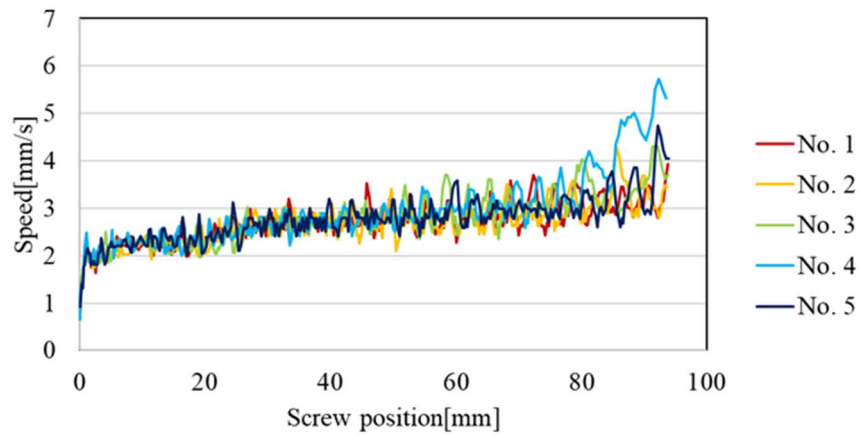
可塑化条件の背圧値を変化させることにより，加熱シリンダ内の樹脂密度が相対的に変化し，スクリュ先端部（ノズル内）の圧力値も変化する．そこで，背圧値がスクリュの後退速度に及ぼす影響を確認した．Table 4-2 に本実験に用いた条件を示す．

Table 4-2 Experimental conditions for varying back pressure.

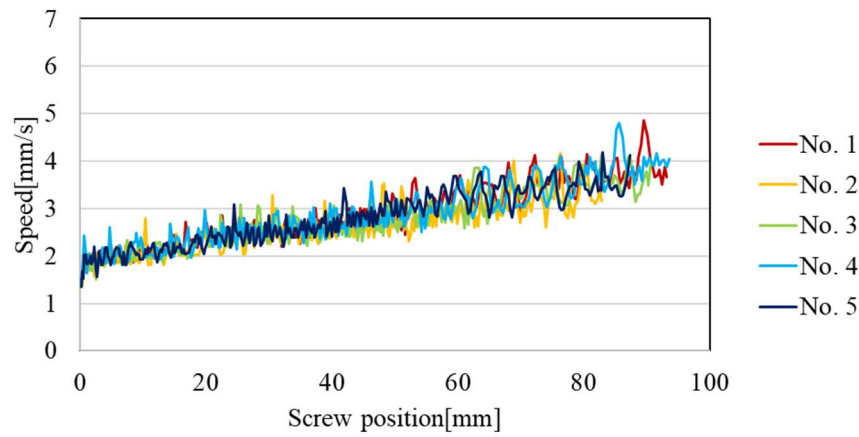
Screw rotation speed [rpm]	60		100
Cylinder temperature [°C]	170		
Injection speed [mm/sec]	15		
Back Pressure [MPa]	2.5	5	7.5
Measuring stroke [mm]	96		

4.3.2 実験結果および考察

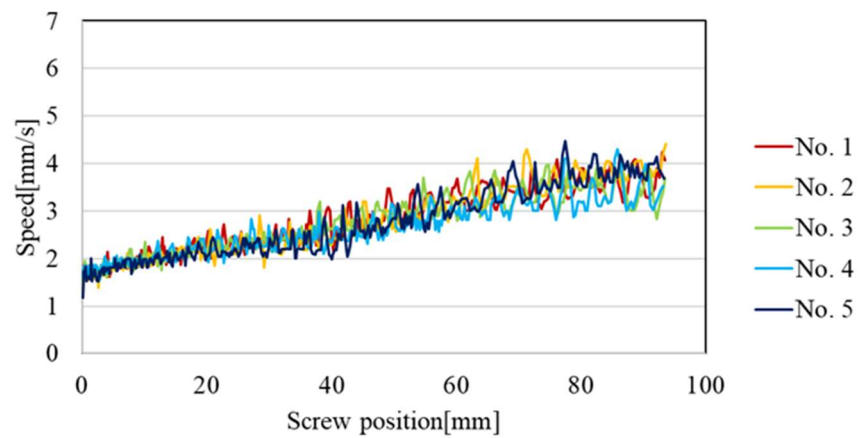
各回転速度における背圧がスクリュの後退速度に及ぼす影響を Fig. 4-2 および Fig. 4-3 に示す．回転速度が 60rpm の場合については，背圧 2.5MPa の条件ではストロークが 50mm を超えるあたりから後退速度のばらつきが大きくなっていることが確認された．一方で，背圧が 5.0MPa，7.5MPa と大きくなるにつれ，ばらつきは低減される傾向にあることが確認された．また，ストロークが 50mm よりも小さい領域においては，いずれの背圧の条件でもばらつきに差はなく，背圧の影響が小さいことが確認された．回転速度が低く，背圧を小さくすることにより，せん断応力による樹脂へのエネルギー量は小さくなると考えられ，ストロークが大きくなった場合には溶融するエネルギー量が不足し，ばらつきが大きくなったと考えられる．回転速度が 100rpm の場合においては，背圧を変化させてもばらつきの大きさはあまり変わらないことが確認された．回転速度によるせん断応力のエネルギーにより樹脂の溶融が低回転速度時に比べ促進されたためと考えられる．



(a) 2.5MPa

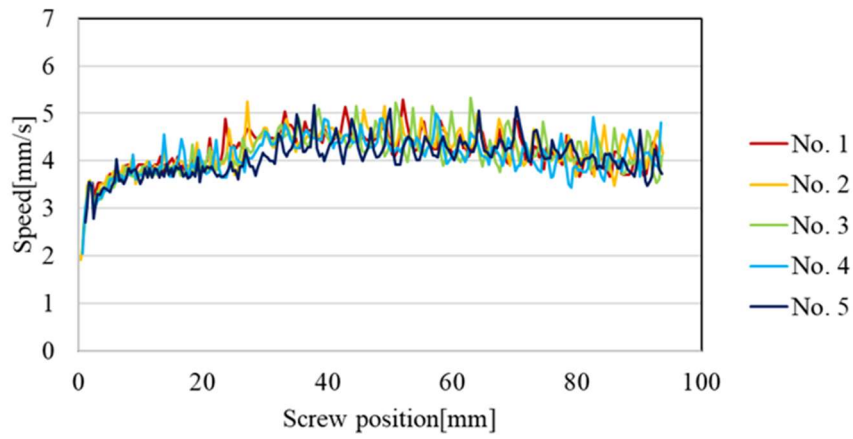


(b) 5.0MPa

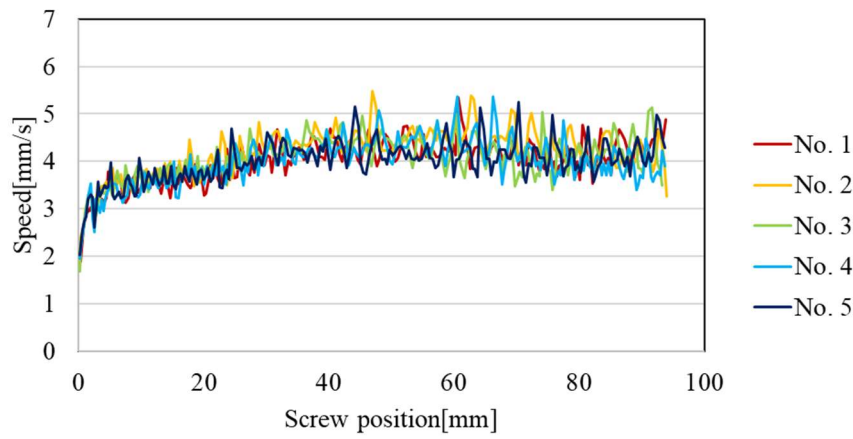


(c) 7.5MPa

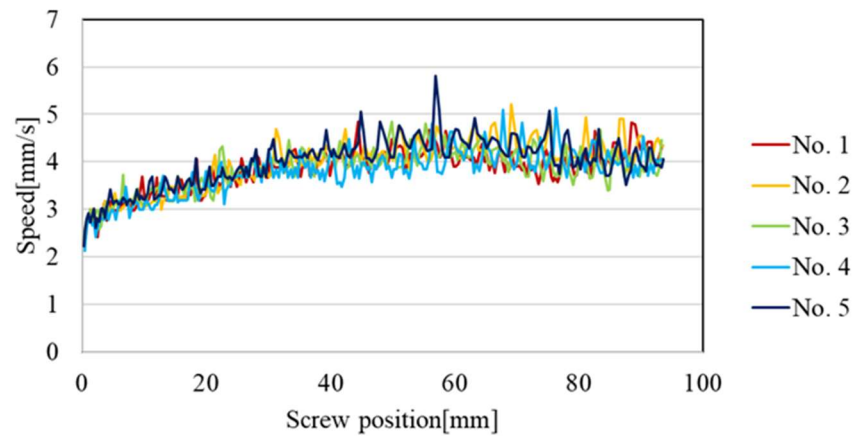
Fig. 4-2 Backward behavior of screw due to difference in back pressure (60rpm).



(a) 2.5MPa



(b) 5.0MPa



(c) 7.5MPa

Fig. 4-3 Backward behavior of screw due to difference in back pressure (100rpm).

4.4 スクリュ供給部ヒータ温度の影響評価

3.3 節においてスクリュ回転速度が異なる場合に、樹脂ペレットがスクリュ圧縮部に輸送される際、この間での熔融状態が異なっていることの影響が示唆された。一般的には、ホッパ近傍の温度を高くすることは推奨されないが、本校では、供給部のシリンダ設定温度を高くする影響について検討した。

4.4.1 実験条件

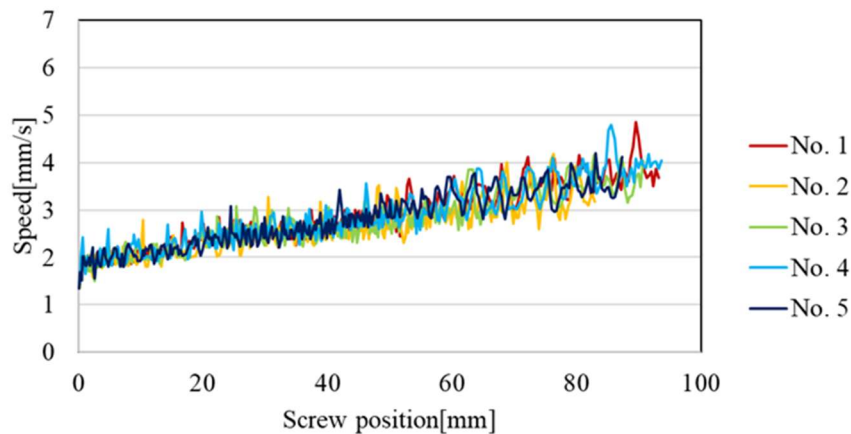
本実験においてはスクリュの供給部にあたるヒータ 4 の領域のみ加熱シリンダの温度を 200℃に設定することで、スクリュの後退速度にどのような影響があるかを確認した。実験条件を Table 4-3 に示す。

Table 4-3 Experimental conditions for varying cylinder temperature.

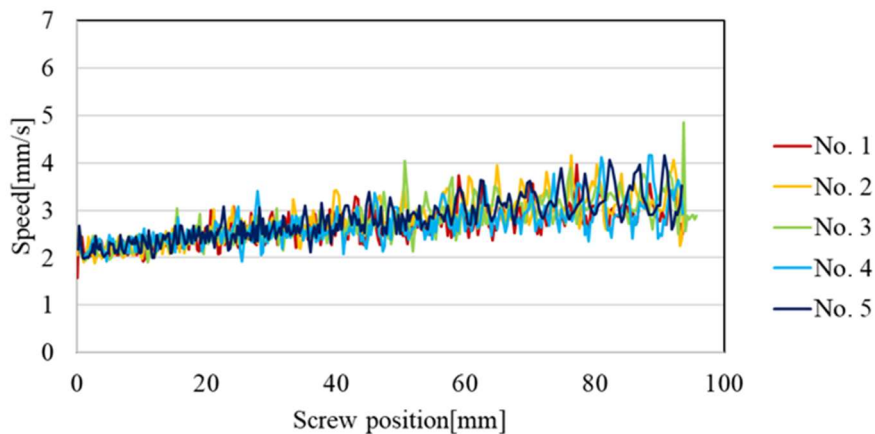
Screw rotation speed [rpm]	60	100
Cylinder temperature [°C] (Heater1-3)	170	
Cylinder temperature [°C] (Heater4)	170	200
Injection speed [mm/sec]	15	
Back Pressure [MPa]	5	
Measuring stroke [mm]	96	

4.4.2 実験結果および考察

60rpm の場合の加熱シリンダ温度の違いによるスクリュ後退速度の比較を Fig. 4-4 に、100rpm の場合の加熱シリンダの温度の違いによるスクリュ後退速度の比較を Fig. 4-5 に示す。60rpm の場合において、ヒータ 4 の設定温度が 170℃であった場合には、スクリュ後退速度が徐々に速くなる傾向にあった。しかしながら、200℃に上昇させることにより後半領域においてもスクリュの後退速度は上昇しない傾向となり、温度を変化させる前に比べ安定した後退挙動となっていることがわかる。この要因については、新規でホッパ口から入るペレットの樹脂温度がより早く上昇することにより、スクリュとペレット間の摩擦が増し、もともと滞留している樹脂の送り速度との差が小さくなったためであると考えられる。また、回転速度 100rpm においては、ヒータ 4 の設定温度が 170℃であった場合にはスクリュが後退するにつれ速度がやや低下する傾向にあった。しかしながら、200℃に上昇させることで、後退速度の減少が抑制され、より安定した後退挙動となった。この要因に



(a) 170°C

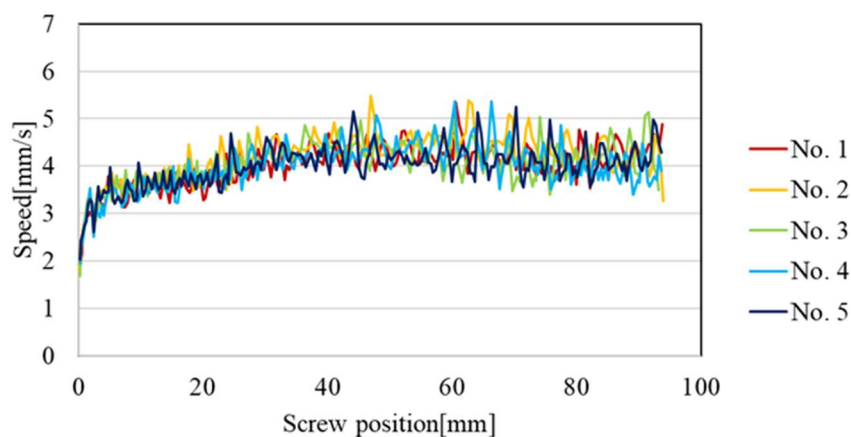


(b) 200°C

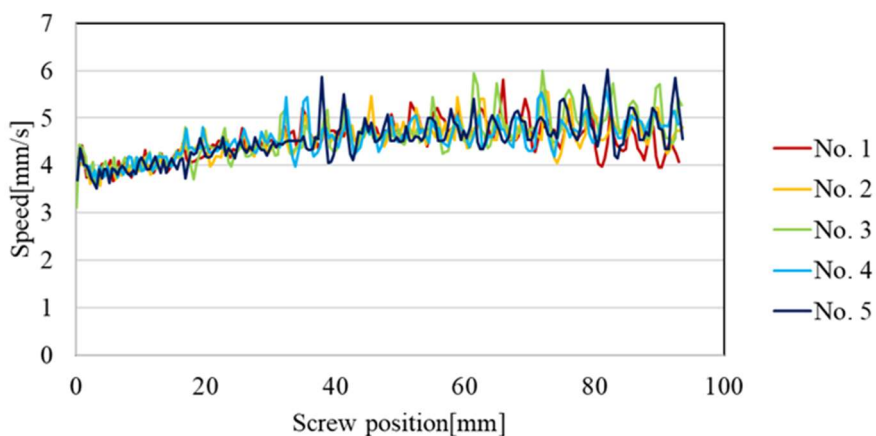
Fig. 4-4 Backward behavior of screw at different heater temperatures (60rpm).

については、回転速度が速い場合にはスクリュ圧縮部に熱量が不足した状態で輸送され、つまりを起こしていたが、ペレットの樹脂温度がより早く上昇することによりこれらが改善したためと考えられる。スクリュ回転速度の違いによりスクリュ位置による後退速度のばらつき方に異なる傾向がみられていたが、いずれの場合においてもスクリュ供給部付近の加熱シリンダ温度を上昇させることによって安定した後退挙動になることがわかった。

後退挙動がヒータ4の温度を変化させることで安定したが、その際に実際に溶解している樹脂の状態がどのようになっているかを確認する必要がある。そこで、それぞれの条件における射出工程時のノズル圧力を比較した。回転速度60rpm時のノズル内圧を Fig. 4-6に、



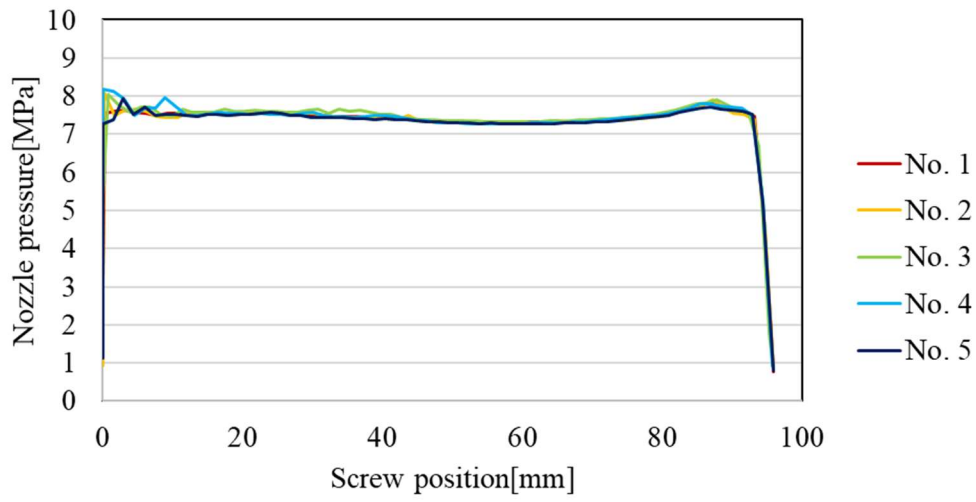
(a) 170°C



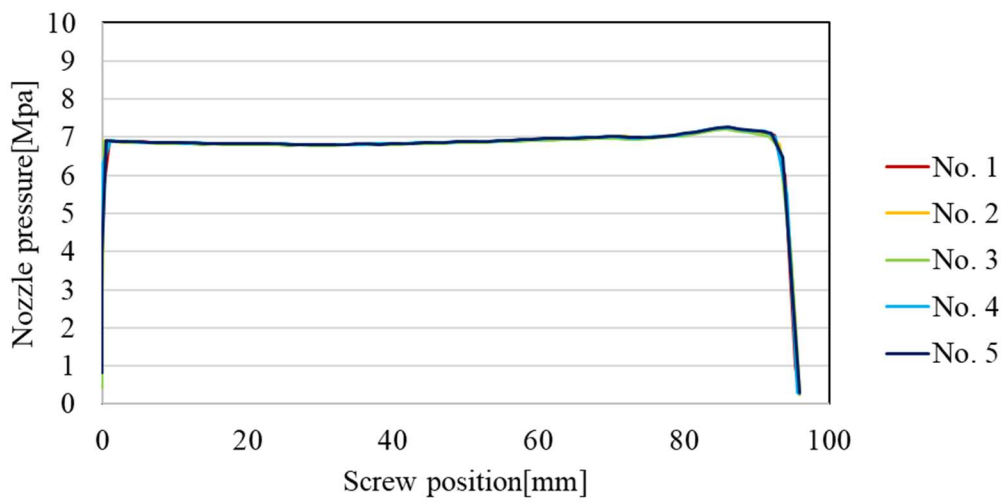
(b) 200°C

Fig. 4-5 Backward behavior of screw at different heater temperatures (100rpm).

回転速度 100rpm 時のノズル内圧を Fig. 4-7 に示す. いずれの回転速度においてもヒータ 4 が 170°C の場合においては射出後半 (スクリュ位置が前方) において圧力に乱れが生じていることが確認できた. 一方で, ヒータ 4 を 200°C に上昇させることによりこれらの圧力の乱れは一切なくなっていることがわかった. つまりは, 後退速度が安定している際に, 熔融した樹脂の状態が安定していることが示唆された.

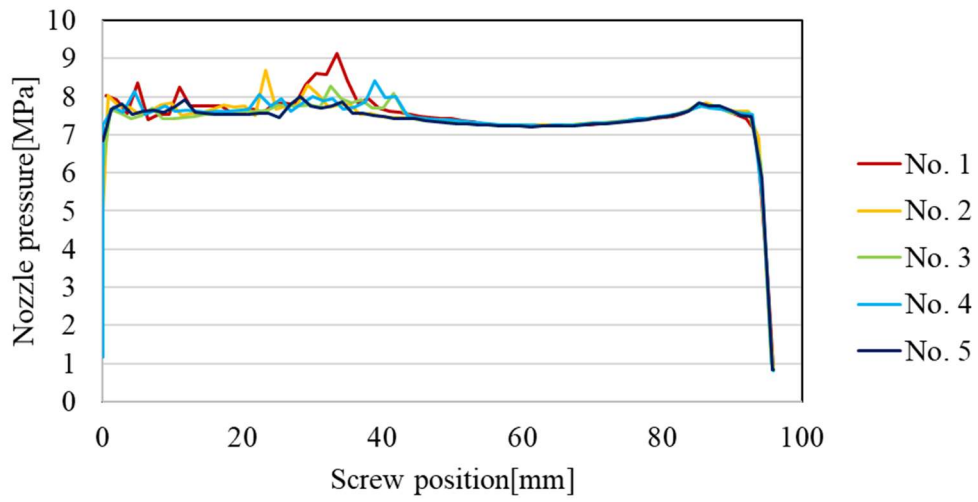


(a) 170°C

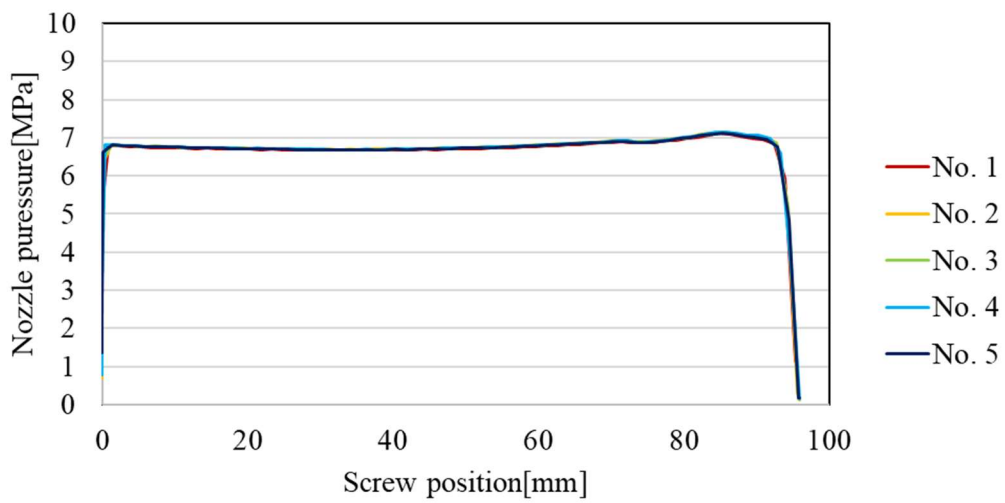


(b) 200°C

Fig. 4-6 Nozzle pressure at each condition (60rpm).



(a) 170°C



(b) 200°C

Fig. 4-7 Nozzle pressure at each condition (100rpm).

4.5 結言

射出成形の可塑化工程におけるスクリュの背圧，加熱シリンダの温度がスクリュの後退速度に及ぼす影響を実験により確認した．実験結果より以下の結論が得られた．

- スクリュ回転速度が低く，背圧が低い場合においては計量ストロークが大きい領域においてスクリュの後退速度のばらつきが確認され，背圧が上昇するにつれ，ばらつきが低減された．
- スクリュ回転速度が低い場合でも，計量ストロークが **50mm** 以下の領域ではスクリュ後退速度のばらつきが背圧によらず小さいことが確認された．
- スクリュ回転速度が高い場合には，スクリュ後退速度のばらつきは背圧の影響を受けないことが確認された．
- スクリュの供給部に位置するヒータの温度を上昇させることにより，スクリュの後退速度が安定する．
- スクリュ後退速度と射出工程時のノズル内での樹脂圧力を確認し，これらの値には関係性がみられた．また，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へつながることが示唆された．

第5章 総括

5.1 本研究で得られた結論

本研究では、安定した成形が求められる射出成形において、さらなる機能向上のため、可塑化完了後の樹脂溶融状態の評価方法の確立とそれらに影響を与える要因の分析を目的とした。

以下に、各章で明らかになった要点をまとめる。

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化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、溶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サイクル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サイクル中における樹脂の溶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、ならびに流動解析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。さらに溶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、理想的な樹脂溶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溶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 サイクル中の樹脂の溶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、これらから樹脂の溶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、ばらつきに低減へつなが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溶融を評価する指標となることが示唆された。

5.2 今後の展望

樹脂成形品の多様化に伴う射出成形技術の高機能化は、今後もますます進展すると考えられ、目的に応じた可塑化を達成するための要求が高まると予想される。特に近年では、「環境破壊」、「地球温暖化の防止」、「完全自動化」が求められている。それぞれに対しては、脱炭素（石油）社会、環境維持・循環型社会の構築、AI活用によるロボット化などが課題として挙げられるが、その効果としては、プラスチック材料の削減、リサイクル可能材料の使用、カーボンニュートラルな材料の使用、省エネルギー、省人化などが考えられる。このような要求に対し、射出成形技術として対応が出来ることと、どのような技術が必要かについて Fig. 5-1 に示す。

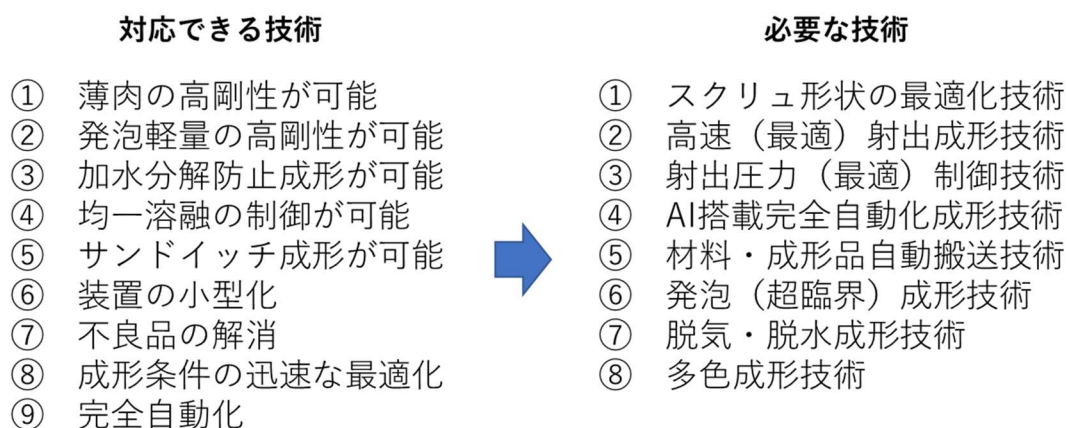


Fig. 5-1 Technologies required for injection molding machines.

これまで、スクリュ形状の最適化技術 [76]、射出圧力制御技術 [67]、材料・成形品自動搬送技術 [79]、発泡成形系技術 [80]、脱気・脱水成形技術 [9]などについては多くの研究がなされてきたが、AI搭載完全自動化成形技術については未だ発展途上である。また最終的には、樹脂粘度（Viscosity）を制御し、射出速度（Velocity）を最適化し、成形品を可視化（Visual）するV³のコントロール成形技術が必要であると考えられる。

さらに、自動化制御については、成形機側での制御技術と数値解析技術を組み合わせる必要であり、事前予測、フィードバック制御、射出条件のデータベース化などと組み合わせることにより、射出成形機のインテリジェント化への対応が可能であると考えられる。しかしながら、これら技術を確立するうえで、射出成形における可塑化後の樹脂の溶融状態につい

では把握することが困難であり、予測制御において課題となっていた。そのような中、本研究では可塑化完了後の樹脂の溶融状態に着目し、その評価手法について検討をおこなってきたが、その有効性が示されたことで開発効率の向上に繋がるものと考えられる。さらに、可塑化条件と樹脂の溶融状態との関係性が得られることにより、より効率的な可塑化条件の最適化がおこなわれることが期待される。この技術により Fig. 5-2 に示すような成形品を可視化する技術が確立され、AI 搭載のシステムに繋がれると期待される。



Fig. 5-2 Image of AI-equipped system.

しかし、材料の高機能化にともない多種にわたる樹脂が存在する中、それぞれの樹脂における特性を見極めなければならない課題が残る。そのため、本研究で得られた手法をもとにデータの蓄積が必要になると考えられる。

最後に、複数の現象が複合的に作用する成形加工プロセスにおいて、それぞれの現象を定量化することの意義は高く、今後も継続した検討が必要と考える中、本研究での成果が足掛かりとなり今後の成形加工分野の発展に貢献できることを期待して本論文を締めくくりたい。

参考文献

- [1] 井上玲, “射出成形におけるスクリュ形状の最適化に関する研究,” 2017.
- [2] プラスチック成型加工学会, 流す・形にする・固める, 渋谷区: シグマ出版, 1996.
- [3] J.W.Hyatt, "The ram injection molding machine". USA Patent 133229, 19 November 1872.
- [4] プラスチック成形加工辞典編集委員会, 実用プラスチック成形加工辞典, 東京, 東京都: 産業調査会, 1997.
- [5] 経済産業省, "機械統計年報," 2021.
- [6] プラスチック成形加工学会編, テキストシリーズ成形加工学 6: 先端成形加工技術, 東京: シグマ出版, 2004.
- [7] 山下幸貴, 松竹由賢, "全電動導光板専用射出成形機の技術開発 (特集 プラスチック機械)," *産業機械*, no. 763, pp. 12-14, 2014.
- [8] 高次聡, "電動射出成形機 「ロボショット α-S2000iA シリーズ」 の最新技術 (特集 高付加価値生産を実現する射出成形技術)," *プラスチックスエージ*, vol. 61, no. 2, pp. 82-86, 2015.
- [9] 正木亮, 塩見浩一, "最新電動射出成形機 「Si-6 シリーズ」 と真空脱気システム 「SAG+ α」 (特集 高付加価値生産を実現する射出成形技術)," *プラスチックスエージ*, vol. 61, no. 2, pp. 77-81, 2015.
- [10] 横井秀俊, "射出成形," *塑性と加工*, vol. 57, no. 660, pp. 8-13, 2016.
- [11] 伊藤忠, 曾根忠利, 中川曠, “射出成形,” 1990.
- [12] 八木博, "プラスチック成形法の進歩," *化学工学*, vol. 33, no. 3, pp. 30-34, 1969.
- [13] 日精樹脂インジェクション研究会, 知りたい射出成形, ジャパンマシニスト社, 2007.
- [14] James L. White, H. Potente, *Screw Extrusion*, HANSER Publishers, 2002.
- [15] M. M. Arthur, "Plastics technology," vol. 1, 1955.
- [16] B. H. Maddock, "A Visual Analysis of Flow and Mixing in Extruder Screws," vol. 15, 1959.

- [17] L. F. Street, "Plasticating extrusion," vol. 1, 1961.
- [18] Z. Tadmor, "Fundamentals of plasticating extrusion. I. A theoretical model for melting," vol. 6, no. 3, pp. 185-190, July 1966.
- [19] Z. Tadmor, H. J. Duvdevani and I. Klein, "Melting in plasticating extruders theory and experiments," *Polymer Engineering & Science*, vol. 7, no. 3, pp. 198-217, 1967.
- [20] Z. a. I. K. Tadmor, *Engineering principles of plasticating extrusion.*, Van Nostrand Reinhold Co.,, 1970.
- [21] R. J. Vermeulen, G. P. Scargo and J. W. Beek, "The melting of a crystalline polymer in a screw extruder," *Chemical Engineering Science*, vol. 26, no. 9, pp. 1457-1465, 1971.
- [22] R. C. Donovan, "A theoretical melting model for plasticating extruders," vol. 11, no. 3, pp. 247-257.
- [23] R. C. Donovan, D. E. Thomas and L. D. Leversen, "An experimental study of plasticating in a reciprocating - screw injection molding machine," vol. 11, no. 5, pp. 353-360, 1971.
- [24] R. C. Donovan, "The plasticating process in injection molding," vol. 14, no. 2, pp. 101-111, 1974.
- [25] I. R. Edmondson and R. T. Fenner, "Melting of thermoplastics in single screw extruders," vol. 16, no. 1, pp. 49-56, 1975.
- [26] J. Shapiro, A. L. Halmos and J. R. A. Pearson, "Melting in single screw extruders," vol. 17, no. 10, pp. 905-918, 1976.
- [27] J. T. Lindt, "A dynamic melting model for a single - screw extruder," vol. 16, no. 4, pp. 284-291, 1976.
- [28] J. T. Lindt, "Pressure development in the melting zone of a single - screw extruder," vol. 21, no. 17, pp. 1162-1166.
- [29] B. Elbirli, J. T. Lindt and S. R. Gottgetreu, "Mathematical modeling of melting of polymers in a single - screw extruder," vol. 24, no. 12, pp. 988-999, 1984.
- [30] J. T. Lindt and B. Elbirli, "Effect of the cross - channel flow on the melting

performance of a single - screw extruder," vol. 25, no. 7, pp. 412-418, 1985.

- [31] 小山清人, 佐藤勲, 横井秀俊, テキストシリーズ プラスチック成形加工学 I 流す・形にする・固める, シグマ出版, 1999.
- [32] 沢田慶司, 押出成形技術入門: 基礎と応用技術, シグマ出版, 1995, p. 224.
- [33] 龍野道宏, 横井秀俊, "押出成形と射出成形における可塑化過程モデル," vol. 54, no. 3, pp. 167-176, 2002.
- [34] 横田明, 射出成形加工の不良対策, 2 ed., シグマ出版, 2012, p. 309.
- [35] 有方広洋, 射出成形大全, 日刊工業新聞社, 2016, p. 319.
- [36] 龍野道宏, 小林恒司, 山極佳年, "樹脂可塑化状態と射出成形品品質との相関解析," 成形加工, vol. 19, no. 3, pp. 170-174, 2007.
- [37] 本間精一, "現場で役立つ射出成形の基礎と実際(第4回)第3章 可塑化・計量工程(その1)," プラスチックス, vol. 59, no. 12, pp. 85-91, 2008.
- [38] 本間精一, "現場で役立つ射出成形の基礎と実際(第5回)第3章 可塑化・計量工程(その2)," プラスチックス, vol. 60, no. 1, pp. 148-155, 2009.
- [39] 早崎寛朗, "電動成形機の新展開-新成形法と新理論可塑化装置(特集 射出成形機-環境対策と更なる省エネルギーを目指して)," プラスチックスエ-ジ, vol. 55, no. 2, pp. 60-64, 2009.
- [40] 神田幸二, 中島英昭, 千葉英貴, "真空脱気装置の開発(プラスチック機械特集号)," 日本製鋼所技報, vol. 59, pp. 46-50, 2008.
- [41] 市川十四男, "ベント式射出成形の復活に賭ける," プラスチックス, vol. 62, no. 9, pp. 100-103, 2011.
- [42] 福島勝仁, "加熱筒内高真空可塑化装置「バクメルタ」を搭載した電動射出成形機「Mu シリーズ」(特集 射出成形機に見る生産効率の改善と環境への対応)," プラスチックスエ-ジ, vol. 54, no. 2, pp. 71-76, 2008.
- [43] 横井秀俊, 岩崎龍一, 平野彰士, 鈴木謙克, 坂井秀敏, "可視化加熱シリンダによる可塑化過程の画像解析 I," 成形加工'91, pp. 15-18, 1991.
- [44] 横井秀俊, 坂井秀敏, 鈴木謙克, 増田範通, "可視化加熱シリンダによる可塑化過程の

- 画像解析Ⅲ－結晶性樹脂の可塑化解析－," *成形加工'92*, pp. 191-194, 1992.
- [45] 横井秀俊, 鈴木謙克, 長谷元弘, 雲野雅弘, "可視化加熱シリンダによる可塑化過程の画像解析Ⅱ－非晶性樹脂の可塑化解析－," *成形加工'92*, pp. 195-198, 1992.
- [46] 早崎進, 黒田章公, "可視化加熱シリンダによる可塑化プロセス (特集 プラスチック機械)," *産業機械*, no. 631, pp. 28-30, 2003.
- [47] Cox, A. P. D., J. G. Williams and D. P. Isherwood, "The melting behavior of a low density polyethylene powder in a screw extruder," *Polymer Engineering & Science*, vol. 21, no. 2, pp. 86-92, 1981.
- [48] 横井秀俊, 岡克典, 根岸智春, "可視化加熱シリンダによる可塑化過程の画像解析Ⅳ－ブレイクアップ現象の解析－," *成形加工'93*, pp. 219-222, 1993.
- [49] 横井秀俊, 白石亘, "ホップ下におけるペレット挙動の解析," *成形加工'94*, pp. 223-226, 1994.
- [50] 高橋和仁, 松田忠裕, 鴨下隆志, 早崎寛郎, 矢野宏, "射出成形機における可塑化装置の最適化," *品質工学*, vol. 13, no. 2, pp. 53-59, 2005.
- [51] 高橋和仁, "射出成形の高度化を推進する品質工学 (10) 可塑化装置の最適化とスクリュ設計," *プラスチック*, vol. 57, no. 6, pp. 149-154, 2006.
- [52] 高橋和仁, 矢野宏, "射出成形の高度化を推進する品質工学 (11) 可塑化装置の最適化とスクリュ設計," *プラスチック*, vol. 57, no. 8, pp. 75-80, 2006.
- [53] 梶原稔尚, "高分子液体の流動および高分子成形加工の数値シミュレーションに関する研究," *日本レオロジー学会誌*, vol. 27, no. 4, pp. 219-226, 1999.
- [54] J. A. Speur, H. Mavridis and J. Vlachopoulos, "Flow patterns in the calender gap of a counterrotating twin screw extruder," *Advances in Polymer Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 39-48, 1987.
- [55] D. S. Z. Bigio, "Parametric study of a 2 - d model of the nip region in a counter - rotating, non - intermeshing twin screw extruder," *Polymer Engineering & Science*, vol. 31, no. 19, pp. 1400-1410, 1991.
- [56] 寒河江勝彦, 小泉真, 山川正剛, "高粘性非ニュートン流体の数値解法," *日本機械学会論文集 (B編)*, vol. 55, no. 517, pp. 2618-2625, 1989.

- [57] 梶原稔尚, 中野祥生, 二之宮慎一, 船津和守, "二軸スクリュ押出機の性能に関する理論的研究," *成形加工*, vol. 5, no. 8, pp. 557-568, 1993.
- [58] 劉麗潔, 東久光, 長嶋勇希, 梶原稔尚, 船津和守, "二軸スクリュ押出機の性能に関する理論的研究 第 2 報 循環流を伴うかみ合い型異方向回転二軸スクリュを用いた三次元流動解析," *成形加工*, vol. 9, no. 2, pp. 169-175, 1997.
- [59] 劉麗潔, 長嶋勇希, 梶原稔尚, 船津和守, "二軸スクリュ押出機の性能に関する理論的研究 第 3 報 かみ合い同方向回転セルフクリーニング型二軸スクリュを用いた三次元流動解析," *成形加工*, vol. 9, no. 8, pp. 652-660, 1997.
- [60] T. Ishikawa, S. Kihara and K. Funatsu, "3 - D non - isothermal flow field analysis and mixing performance evaluation of kneading blocks in a co - rotating twin screw extruder," *Polymer Engineering & Science*, vol. 41, no. 5, pp. 840-849, 2001.
- [61] B. Alsteens, V. Legat and Th. Avalosse, "Parametric study of the mixing efficiency in a kneading block section of a twin-screw extruder," *International Polymer Processing*, vol. 19, no. 3, pp. 207-217, 2004.
- [62] 福谷和久, 山田紗矢香, 山口和郎, 山根泰明, "二軸押出機におけるロータセグメントの混練特性," *成形加工*, vol. 20, no. 11, pp. 813-817, 2008.
- [63] Z. Tadmor and C. G. Gogos, *Principles of polymer processing*, Second edition, John Wiley & Sons, 2006, p. 984.
- [64] A. G. Cunha, *Modelling and Optimisation of Single Screw Extrusion: Using Multi-Objective Evolutionary Algorithms*, Lap Lambert Acad. Publ., 2009, p. 256.
- [65] 柴田和之, "樹脂の熔融粘度をコントロールする< meltcon >," *プラスチックスエージ*, vol. 59, no. 2, pp. 85-88, 2013.
- [66] 東洋機械金属株式会社, 電動サーボ射出成形機 Si-6S series, 東洋機械金属株式会社, 2018.
- [67] ENGEL, "iQ weight control," ENGEL, 2022. [Online]. Available: <https://www.engelglobal.com/ja/jp/products/increase-process-stability/automatically-compensating-of-process-fluctuations-iq-weight-control.html>. [Accessed 24 8 2022].

- [68] ENGEL, "iQ melt control," ENGEL, 2022. [Online]. Available: <https://www.engelglobal.com/ja/jp/products/increase-process-stability/smart-plasticising-assistant-iq-melt-control.html>. [Accessed 24 8 2022].
- [69] Wittmann-Battenfeld, "Full control of the material," WITTMANN Technology GmbH, 2022. [Online]. Available: <https://www.wittmann-group.com/en/wittmann-battenfeld-hiq-technology>. [Accessed 5 9 2022].
- [70] KraussMaffei, "APC plus," KraussMaffei, 2022. [Online]. Available: <https://www.kraussmaffei.com/en/our-products/digital-products/apc-plus>. [Accessed 5 9 2022].
- [71] P. Guerrier, G. Tisello and J. H. Hattel, "Flow visualization and simulation of the filling process during injection molding," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 16, pp. 12-20, 2017.
- [72] A. Altinkaynak, M. Gupta, M. A. Spalding and S. L. Crabtree, "Melting in a Single Screw Extruder: Experiments and 3D finite Element Simulations," *International Polymer Processing*, vol. 26, no. 2, pp. 182-196, 2011.
- [73] A. Altinkaynak, M. Gupta, M. A. Spalding and S. L. Crabtree, "An investigation of melting and metering sections in single-screw extruder," *SPE ANTEC The Papers*, vol. 60, pp. 1135-1141, 2014.
- [74] J. Y. Chen, K. J. Yang and M. S. Huang, "Online quality monitoring of molten resin in injection molding," *International journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 122, pp. 681-693, 2018.
- [75] 市川常雄, 改訂新版水力学・流体力学, 新宿区: 朝倉書店, 1981.
- [76] 井上玲, 田中達也, 荒尾与史彦, 野元將義, 下楠菌壯, "射出成形におけるスクリュ形状の違いによる FRTP の繊維長と分散性," *成形加工*, vol. 26, no. 6, pp. 276-285, 2014.
- [77] 横井秀俊, 高次聡, 白石亘, "可視化・温度分布計測用小型加熱シリンダの開発," *生産研究*, vol. 52, no. 9, pp. 410-413, 2000.
- [78] 深沢勇, 射出成形加工のトラブル対策, 中央区: 日刊工業新聞社, 2005.
- [79] LEGOSystemA/S, "Molding factories in Billund," LEGO System A/S, 2022.

[Online]. Available: <https://www.lego.com/ja-jp/history/articles/c-molding-factories-in-billund>. [Accessed 6 9 2022].

- [80] 松尾明憲, 澤田靖丈, "新たな発泡成形技術「液状発泡成形」と外観をきれいにする「ガス・カウンター・プレッシャー」," *プラスチックエージ*, vol. 67, no. 2, pp. 61-65, 2021.

本論文に関する公表文献

[原著論文]

- 1) S. Shimokusuzono, T. Tanaka, M. Sasada, Y. Hirao, K. Hanafusa and A. Inoue, “Molten State of Thermoplastic Resin in an Injection Moulding Barrel” , *WIT Transactions of Engineering Sciences*, Vol.125, pp.49-59 (2019)
- 2) 下楠 菌 壮, 田中 達也, 笹田 昌弘, 紀藤 駿介, 関川 玄徳, “射出成形における樹脂可塑化工程時のスクリュ後退挙動に関して”, *ハリス理化学研究報告*, Vol.63, No.3, pp155-162 (2022)

[原著掲載決定論文]

- 1) 下楠 菌 壮, 井上 玲, 田中 達也, 笹田 昌弘, 山本 良平, “射出成形における可塑化プロセスが樹脂熔融状態へ与える影響”, *成形加工* (2023)

[国際会議]

- 1) Yuka Hirao, Tatsuya Tanaka, So Shimokusuzono, “Flow Behavior of Thermoplastic Resin in the Barrel of Injection Molding”, 34th International Conference on the Polymer Processing Society (PPS-34), 2018.
- 2) So Shimokusuzono, Tatsuya Tanaka, Masahiro Sasada, Yuka Hirao, Kanta Hanafusa, Akira Inoue, “Molten State of Thermoplastic Resin in an Injection Moulding Barrel” *WIT Transaction on Engineering Sciences*, Vol. 125, pp. 49-59, (2019)

[国内会議]

- 1) 下楠 菌 壮, 平尾 優佳, 田中 達也, “射出成形におけるシリンダ内の樹脂流動挙動に関して”, プラスチック成形加工学会 第 31 回成形加工シンポジウム’17, 2017.
- 2) 平尾 優佳, 田中 達也, 下楠 菌 壮, “射出成形における樹脂溶融メカニズムについて”, 第 9 回自動車用途コンポジットシンポジウム講演論文集, Vol.2017, pp.53-54, 2017.
- 3) 山本 良平, 田中 達也, 笹田 昌弘, 下楠 菌 壮, “射出成形におけるセンシング技術を用いた樹脂均一溶融の評価”, プラスチック成形加工学会 第 31 回年次大会, 2020.
- 4) 山本 良平, 田中 達也, 笹田 昌弘, 下楠 菌 壮, “射出成形における計量ストロークとスクリュ回転数が樹脂の溶融状態に与える影響について”, 第 12 回自動車用途コンポジットシンポジウム講演論文集, Vol.2020, pp.63-64, 2020.
- 5) 山本 良平, 田中 達也, 笹田 昌弘, 下楠 菌 壮, “射出成形における可塑化条件が溶融状態に与える影響”, プラスチック成形加工学会 第 32 回年次大会, 2021.

謝辞

本論文は、筆者が東洋機械金属株式会社に勤務する中で、同志社大学大学院 理工学研究科 機械工学専攻 博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものである。

同専攻教授 田中達也先生には指導教官として、本研究の実施の機会を与えていただき、その遂行にあたっては終始懇切なるご指導とご助言、ならびに公私にわたり様々なアドバイスを頂いたことに謹んで感謝の意を表します。また、本論文をまとめるにあたり、副査としてご助言を頂くとともに本論文の細部にわたりご指導頂いた、同専攻教授 大窪和也教授、笹田昌弘先生に深く感謝の意を表します。

東洋機械金属株式会社 井上玲基盤技術部長には、博士号の取得をご相談した折に社内での交渉にご尽力頂き、大学入学の機会を得ることができたこと、心より厚く御礼申し上げます。また、東洋機械金属株式会社 中村孝夫執行役員本部長、武信秀也執行役員副本部長、森克巳フェローには、本研究を遂行するためのご配慮を頂いたことに感謝の意を表します。

本研究の遂行にあたり、同志社大学 応用材料工学研究室 平尾優佳氏、花房幹太氏、山本良平氏、紀藤駿介氏には、有益なる議論とともに格別なるご協力を頂きました。そして、東洋機械金属株式会社 基盤技術開発部 青山慶彦氏、田中博子氏をはじめスクリュチーム諸氏には日々の業務が多忙な中、実験やデータ解析にご協力を頂きました。

最後に、業務との両立の中で博士号の取得まで研究を優先し、家族サービスも十分に行き届かない中、いつも明るく応援してくれた妻、そしていつもあたたかく見守ってくれた両親に心より感謝いたします。

2022年12月 下楠 菌 壮