射出成形

龍 野 道 宏*

1. はじめに

射出成形は、複雑な3次元形状を一工程で生産できると、成形サイクルが短く大量生産に適すること、生産工程の自動化を図りやすいことなどの利点を持つ合理的な生産方法である。その製品の高機能化や、さらなる生産性向上のために、新たな成形プロセスの開発が継続して進められてきている。

射出成形プロセスは、材料樹脂を可塑化し、金型内に充填して賦形し、冷却して取り出すという一連の工程である。その最初の可塑化工程において、樹脂から生成するガスを抑制すること¹⁾や、ガラス繊維、炭素繊維などを直接投入して複合化する^{2),3)}などの、新たな技術開発が報告されている。そこで、本稿では、射出成形の可塑化過程での新たな開発事例に関連する飢餓供給、ペント式可塑化過程、およびその応用事例として低圧発泡成形と繊維直接投入成形について、研究動向を紹介する。併せて長繊維強化樹脂の射出成形で課題となっている繊維分散の評価手法についても紹介する。

2. 飢餓供給時の可塑化過程

飢餓供給は、可塑化スクリュ本来の固体輸送能力を下回るようにホッパからの樹脂供給量を制限する方法である。これにより、射出成形における可塑化時の計量不安定現象や、生成ガス排出の効果が経験的に知られている。ここでは、ホッパ近傍のスクリュ溝内が未充填となることで、可塑化プロセスは一般的な満杯供給時と異なったものとなる。この飢餓供給時の可塑化過程については、スクリュを連続的に回転する押出成形において解析されている。射出成形では、可塑化が間欠的に行われ、スクリュの軸方向移動を伴うため、可塑化過程は非定常で周期的に変動することとなる。そのような複雑な現象解析に先立って、射出成形で一般的に使用されている単軸スクリュ可塑化機構における連続可塑化過程の研究が実施されているので、以下に紹介させていただく。

高次らは可視化加熱シリンダを用いて、飢餓供給時の可

塑化過程のホッパ下からシリンダ内の動的可視化解析を実施し、可塑化過程を具体的に明らかにして、飢餓供給時の可塑化モデルを提示した⁴⁾。これについては昨年の研究総覧で紹介した。

一方、Wilczyńskiらはスクリュ引き抜き法による実験解析に基づいた数値モデルを構築し、シミュレーションを実施している^{5)~7)}。図1に満杯供給時と飢餓供給時の熔融状況を示す。スクリュは外径45 mm、圧縮比2.67で樹脂はポリプロピレンである。図1のa)は満杯供給の場合で、スクリュ溝内は樹脂が充満し、フライト押側のメルトプールとフライト引側のソリッドベッドが明瞭に分離したMaddock-Tadmor型の熔融形態を示し、ノズル側ほどソリッドベッド幅が縮小しつつ熔融が進行する。これに対し、b)は飢餓供給の場合で、スクリュ供給部ではスクリュ溝内に空隙が生成し、フライト押側に未熔融ペレットが集まり、熱伝導によりペレット全体に均一に熔融が進行している。その後スクリュ圧縮部において、スクリュ溝内は熔融樹脂中に未熔融ペレットが分散する形態となる。その後は、この懸濁液様の状態のまま未熔融ペレットが連続的に縮小して熔融完了に至るとしている。なお、このような熔融状況は、前述の高次らの動的可視化解析により確認されている⁴⁾。この実験解析に基づき、飢餓供給時の可塑化過程を(1)スクリュ溝が未充填の場合と(2)スクリュ溝が樹脂で充満した場合との2段階で数式化し、連続押出し過程のシミュレーションを実施した。図2に計算事例を示す。図中の“SOLID FRACTION”は未熔融樹脂の割合(以下SFと略記)、“FILL FACTOR”はスクリュ溝内の樹脂充満率(以下FF)、横軸はホッパ下からの距離(以下L)である。ホッパ直下のL=0ではSF=1、FF=0.15とスクリュ溝内は未熔融樹脂が未充填で存在する。樹脂温度はLが進むと共に上昇し、L=0.25で融点に達すると、樹脂溶

図1 満杯供給時と飢餓供給時の熔融メカニズム⁶⁾

Injection Molding

* Tatsuno, Michihiro

東京大学 生産技術研究所 梶原研究室

東京都目黒区駒場 4-6-1 (〒153-8505)

mtatsuno@iis.u-tokyo.ac.jp

2019.3.22 受理

図2 飢餓供給時の可塑化過程シミュレーション⁶⁾

融が開始してSFが減少し始める。その後 $L=0.4$ でFFが一気に上昇し、スクリュ溝内は樹脂が充満し、圧力が立上る。同時に溶融が促進されてSFの減少度合い（グラフの傾き）が大きくなっている。 $L=0.7$ 近傍でSFが0となり完全に溶融すると、融点付近で推移していた温度が上昇に転ずる。ここで $L=0.49\sim0.8$ はスクリュ圧縮部に相当し、樹脂充満位置から大きな圧力上昇が示されている。引き続き $L=0.8$ 以後のスクリュ計量部においては緩やかな圧力上昇が示される。

図3にホッパからの樹脂供給量 G を変更した場合の圧力分布の計算値と実測値を比較して示す。併せて、引き抜き実験によるスクリュの写真を示す。写真の矢印はスクリュ溝内が樹脂で充満した位置を示している。ここで写真の左端が $L=0$ 、右端が $L=1.2$ に相当しているため、圧力分布グラフと照合する際に注意を要する。樹脂は高密度ポリエチレンである。 $G_{FF}=6.1\text{ kg/h}$ は満杯供給に相当し、ホッパ直下の $L=0$ から圧縮部出口の $L=0.8$ まで圧力は直線的に増加し、その後はほぼ一定値を示す。 $G_{SF}=4\text{ kg/h}$ および 5 kg/h は飢餓供給の場合で、樹脂充満位置から圧力が立ち上がり、 $L=1.2$ のスクリュ出口まで圧力がほぼ一様に上昇している。いずれも実験値と計算値は良好な一致を示していると言える。さらに、ダイ出口の形状を変更

図3 圧力分布の推算値と引き抜き法によるスクリュ溝内の溶融状況⁶⁾

した場合は、同一の供給量において出口圧力が上昇すると樹脂充満位置はホッパ側へと移動し、スクリュ内の圧力が上昇するという結果が得られている。これは、射出成形において背圧を変更した場合に同様の現象が生成するものと推察される。

ここでは、連続押出しによる定常現象の解析であり、本質的に非定常な射出成形には直接的には適用できないが、飢餓供給時の特徴的な樹脂溶融過程を数式化し、可塑化現象を具体的に解析できる有用な手法であると考えられる。

3. ベント式可塑化過程

ベント式可塑化機構は、加熱シリンダに排気用のベントポートを設け、材料樹脂中の水分などの揮発成分を除去することなどを目的に、以前から利用されてきた。図4にベント式射出成形機の略図を示す⁸⁾。ホッパからベントポートまでの第1ゾーンで溶融した樹脂を第2ゾーンの深いスクリュ溝へ導入して減圧し、ベントポートから水分などの揮発成分を排出する。その後の第2ゾーンで溶融樹脂を再度昇圧し、所定の樹脂量を計量する。また、ベントポートから溶融樹脂が溢れ出ること（すなわちベントアップ）を抑制するため、前章で紹介した飢餓供給が実施される。材料樹脂の乾燥が不要となる、金型に射出される樹脂から生成ガスを抑制するなどの利点がある一方、ベントアップを抑制するための樹脂供給量など成形条件の設定が煩雑であることや、可塑化樹脂の炭化物生成や変色が発生しやすいこと、樹脂替えや色替えが困難であることなどの欠点がある。

このベント式可塑化機構では、第1ゾーンの飢餓供給による可塑化過程と第2ゾーン入口のスクリュ溝内では溶融樹脂が未充填となりその後に充填される。このような特徴的な可塑化過程について、Hisakuraらは理論と実験の両面からの解析を試みている⁸⁾。図5に解析モデルを示す。スクリュフライトと加熱シリンダ壁面との隙間からの漏洩流を無視して、シリンダ壁面からのけん引流と圧力勾配による背圧流を算出する。スクリュ溝内圧力が0では樹脂が充満しておらず、圧力が0以上で充満状態にあるとしてい

図4 ベント式可塑化機構の概念図⁸⁾

図5 ベント式可塑化過程の解析モデル⁸⁾

る。これによりベントポートのない通常スクリュによる飢餓供給時の可塑化過程と、ベント式可塑化過程のシミュレーションを実施した。図6にベント式可塑化過程において、ホッパからの供給樹脂量を一定とし、スクリュ回転数を変更した場合の圧力分布を示す。スクリュ回転数が低速では、第2ゾーンの圧力は軸方向長さ約640 mmから立ち上がり、ノズル側へ直線的に上昇している。スクリュ回転数を上げるほど圧力の立上り位置はノズル側へと遷移し、スクリュ出口は低下する。また、ベントポートの上流側のスクリュ第1ゾーンの出口付近では、低いながらも圧力上昇が示されている。

図7にシミュレーションによるスクリュ溝の充満率分布と引き抜き法によるスクリュ溝内状況を示す。スクリュ回転数は30 rpmである。スクリュ形状は図6の圧力分布計

1) ベント口近傍からノズルまでの圧力分布

2) ベント口近傍の圧力分布の拡大図

図6 ベント式可塑化過程のスクリュ軸方向圧力分布のシミュレーション⁸⁾

図7 ベント式可塑化過程におけるスクリュ溝充満率の計算値と引き抜き法によるスクリュ写真の比較⁸⁾

算時とは異なっていることに注意が必要である。ここからスクリュ溝の充満率を計測し、計算値と比較した。その結果、スクリュ第1ゾーンにおいては実測値と計算値は良好な一致を示したが、スクリュ第2ゾーンにおいては実測値が計算値を上回る結果となった。ペレット供給量を同一として、スクリュ回転数を205 rpmに変更した場合についても同様の比較を実施した結果、30 rpmの場合よりスクリュ充満率は全体に低下することが認められた。

計算値と実測値に乖離があるものの、スクリュ回転数や樹脂供給量、さらにノズル径の影響についてシミュレーションできることは有用であると考えられる。さらなる検討に期待したい。

4. 低圧発泡成形

ベント式可塑化機構と類似した形態であるものの、新たな発想による低圧発泡技術が遊佐らにより提案されている^{9)~10)}。開発の第1世代として、単軸スクリュ可塑化機構において、可塑化、高压混練、減圧、再昇圧の各ゾーンを形成した。窒素ガスなどの物理発泡剤を高压混練ゾーンに導入し、引き続き減圧ゾーンの背圧弁により発泡圧力を制御し、熔融樹脂中の発泡剤溶解量を調整する。これにより臨界点よりも低い圧力で微細発泡射出成形を可能とした。さらに、この機構を簡略化した第2世代の低圧発泡射出成形装置の概略図を図8に示す。これは、図4に示したベント式可塑化機構と類似の構成であるが、ベントポートに相当する領域に圧力保持容器が、スクリュの減圧ゾーンと可塑化ゾーンの境界にシールリングが設置されている。圧力容器より窒素ガスを導入し、飢餓ゾーンを常時一定圧力に保持することで、熔融樹脂中の発泡剤溶解量を調整する。ポリプロピレンを用いた場合は、窒素ガスの圧力を4 MPa以上とすると発泡セル径が小さくなり、微細発泡成形品を得ることができる。一方ポリアミド6などでは、発泡セル径の圧力依存性は小さく、2 MPa程度の低圧でも微細発泡が可能であった。さらに、ポリプロピレンを用いてホッパからの樹脂供給量を調整し、飢餓ゾーンでの樹脂充満率を変更した場合の発泡状態を図9に示す。充満率を低くするほど発泡セルが微細化することが確認される。

第1世代と比較して第2世代では可塑化装置が大幅に簡略化され、微細発泡成形の有効な手段として期待される。

5. 繊維直接投入射出成形

長繊維強化樹脂射出成形では、一般的に長尺ペレットが用いられるが、可塑化過程での大幅な繊維折損を避けるこ

図8 低圧発泡射出成形装置の概略図⁹⁾

図9 飢餓ゾーンにおける樹脂充満率と発泡セルの関係⁹⁾

図10 連続繊維直接投入射出成形装置の概念図¹²⁾

とができないことが課題となっている。これまで様々な特殊スクリューの開発が試みられ、一定の効果を上げてきた¹¹⁾。これに対して、近年、ベント式可塑化機構のベントポートに連続繊維を導入する直接投入方式が提案されている。図10に装置の概念図を示す。こうした直接投入方式は、繊維折損の抑制、コンパウンドレス、繊維材料の複合化など、優れた特長が期待できる。その一方で、繊維長分布が広く不均一となり易く、安定した繊維含有率を実現することが難しい等、様々な課題が残されている。

Yanらは、ガラス長繊維強化ポリプロピレン（以下GFPP）をホッパから供給し、ベントポートからバサルト繊維（以下BF）を連続投入して得られた複合成形品の強度特性を解析した¹²⁾。ここでは、2種類の射出成形機（型締力30 t/75 t）と試験片（板厚3 mm/4 mm）の組み合わせにおいて、BF投入の有無やGFPPにマレイン酸変性PP（以下MAPP）やポリアミド6（以下PA6）を混入した条件で成形を実施した。図11に各種条件におけるGFとBFの繊維長分布を示す。ここでB0、B1は型締力30 t・板厚3 mm、B0-1、B1-1は型締力75 t・板厚4 mmでの実験であり、B0、B0-1はGFPPのみ、B1、B1-1はBFを連続投入した場合である。ホッパから投入したGFに対し、ベントポートから投入したBFの方がより長い繊維が残存していることが認められる。また、型締力30 tより75 tの場合の方がBF、GF共により長い繊維が残存しており、その要因はチェックリング形状と試験片形状の相違によるとしている。

一方、GFPPのみの成形品強度に対してBF投入の効果

図11 ガラス繊維/バサルト繊維複合材の繊維長分布¹³⁾

図12 ガラス繊維/バサルト繊維複合材料の破断面のSEM観察画像¹³⁾

は、引張強度と曲げ強度に対しては明確には現れず、衝撃強度が僅かに向上したに止まった。図12に成形品破断面のSEM観察画像を示す。B0-1のGFPPのみの場合は、短いGFが全体に分散しているのに対し、B1-1のBF投入時は図中の赤丸で示す様にコア層に長いBFが塊として観察された。これは熔融樹脂中でBFが解繊せず、ピリングとして射出されたものと考えられ、機械的強度向上効果が小さいことの要因であるものと推察された。また、GFPPにMAPPやPA6を混入することで機械的強度向上効果が認められており、SEM観察によりBF塊においても樹脂とBFの濡れ性が改善したことが確認された。

6. 繊維解繊・分散評価方法

上述の繊維直接投入方式を含め、長繊維強化樹脂射出成形において、繊維の解繊と分散は共通した課題であり、その評価手法の確立が求められている。呉らは射出樹脂中の繊維分散性について定量的に評価する手法を提案した^{14)~15)}。図13に繊維分散性評価金型の構成を示す。ヒーターで保温された金型内にノズルから熔融状態の繊維強化樹脂を射出する。熔融樹脂はファンゲートから2枚のガラスブロックで構成される厚さ1 mmの隙間を持つ矩形領域に展開される。ガラスブロックの両側に可視化窓が形成されており、その一方から照明を投射し、他方から可視化領域を通過する熔融樹脂中の繊維分散状況を透過方式により観察する。図14に炭素長繊維強化樹脂の観察画像と解析範囲を示す。

図 13 分散性評価金型の構造¹⁴⁾

図 14 分散性評価金型による炭素繊維強化樹脂の観察画像¹⁵⁾

観察画像は、炭素繊維が良好に分散すると全体に低輝度となるが、解繊不十分な繊維の塊「ピリング」の通過時は炭素繊維の存在しない高輝度領域が出現する。そこで、射出工程の各時点において、画像内である輝度以上の面積を評価領域全面積で除したピリング率を算出した。図 15 に計量背圧変更時のピリング率の時間変化を示す。背圧 4 MPa の場合は射出前半の $t=0.6\sim1.2$ s においてピリング率が上昇し、その後低下する。射出後半の $t=2.0$ s 以後は再度ピリング率が上昇する。ここでピリング率が高い領域ではショットごとのばらつきが大きい。また、背圧を高くするに従い、ピリング率は低下し、ショットごとのばらつきが減少して、分散性が向上しているものと評価される。このように射出過程の分散性を評価し、どの時点でピリングが流出するかを捉えることが可能であり、各種成形条件やスクリュ形状などの繊維分散性評価に極めて有効な手法であるものと考えられる。

7. おわりに

射出成形において、成形品の高機能化と生産工程の合理化を推し進めるにあたり、可塑化機構の機能向上が求められてきている。射出成形の可塑化過程は非定常で複雑な現象であり、その現象解析が理論・実験の両面から取り組まれることが期待される。

図 15 炭素繊維強化樹脂のピリング率の時間変化¹⁵⁾

参 考 文 献

- 1) 松尾明憲：プラスチックエージ，**64**(2)，45(2018)
- 2) 伊藤栄康：プラスチックエージ，**56**(2)，45(2018)
- 3) 高萩征男：プラスチックエージ，**61**(2)，45(2018)
- 4) Wilczyński, K., Lewandowski, A. and Wilczyński, K. J. : *Polym. Eng. Sci.*, **52**, 1258(2012)
- 5) Wilczyński, K. J., Nastaj, A., Lewandowski, A. and Wilczyński, K. : *Polym. Eng. Sci.*, **54**, 2362(2014)
- 6) Wilczyński, K. J. : *Intern. Polym. Process.*, **33**(2)，171(2018)
- 7) 高次聡，横井秀俊：成形加工，**29**(6)，206(2017)
- 8) Hisakura, Y., Hisamitsu, I., Sugihara, M., Tanifuji, S. -I. and Hamada, H. : *Intern. Polym. Process.*, **33**(5)，652(2018)
- 9) 遊佐敦，山本智史，後藤英人：成形加工，**30**(6)，234(2018)
- 10) Yusa, A., Yamamoto, S., Goto, H., Uezono, H., Asaoka, F., Wang, L., Ando, M., Ishihara, S. and Ohshima, M. : *Polym. Eng. Sci.*, **57**, 105(2017)
- 11) 井上玲，田中達夫，荒尾与史彦，野本将義，下楠園壮：成形加工，**26**(6)，276(2014)
- 12) Yan, X. and Cao, S. : *Composite Structure*, **185**, 362(2018)
- 13) Yan, X., Shen, H., Yu, L. and Hamada, H. : *J. Appl. Polym. Sci.*, **134** : 45472(2017)
- 14) 呉小玢，大和田茂，横井秀俊：成形加工シンポジア'17，59(2017)
- 15) 馬賽，呉小玢，横井秀俊：成形加工シンポジア'18，279(2018)