可視化加熱シリンダによる計量可塑化過程の画像解析

第2報 各種樹脂の可塑化過程

龍野道宏^{*1}・高橋幸彦^{*1}・横井秀俊^{*2}

Visualization Analysis of Reciprocating Plastication Process by Glass-Inserted Heating Cylinder Part II : Plastication Process of Various Resins

Tatsuno, Michihiro^{*1}/Takahashi, Yoshihiko^{*1}/Yokoi, Hidetoshi^{*2}

The reciprocating plastication process in injection molding is a dynamic phenomenon during which the relative positions of the screw and the heating cylinder change cyclically. In our previous report, we proposed a visualization analysis method for this process using a glass-inserted heating cylinder. In this study, based on the above proposed method, we carried out an analysis of the reciprocating plastication process using polyethyleneterephthalate, polyamide, polystyrene and polycarbonate. The results are summarized below :

(1) The characteristic plastication processes of the above-mentioned resins in the screw channel could be explained by an extended lamination image of the screw channel and the solid-bed ratio calculated from the image. We were also able to explain the phenomenon of the formation and disappearance of a void (pellet-unfilled area) in the screw channel of the feed zone during the early stages of the charging process for each resin.

(2) The void formed during the initial stages of charging because of a melt-plugging phenomenon occurring in some parts of the screw channel in the feed zone, due to the melting of the resin during the waiting time. This phenomenon resulted in an insufficient supply of resin in the nozzle side of the melt-plugged area, hence forming a void. Moments later, pellets with a wider volumetric space located on the hopper side and compressed by the continued screw rotation would push the melt-plugged area to the nozzle side, causing the void to disappear.

Key words : Injection molding/Reciprocating plastication process/Visualization/Heating cylinder/Screw

1. 緒 言

射出成形は樹脂の可塑化（計量）と金型内への射出が交互に行われる非定常プロセスである。また、可塑化時のスクリュ後退によりペレット供給位置が移動し可塑化に寄与するスクリュ長さが変化すること、射出時のスクリュ前進により回転を伴わないスクリュ溝内に樹脂ペレットが落下充填することなど、スクリュと加熱シリンダとの相対位置変化に起因する可塑化過程の周期的変動があるものと想像

される。

射出成形におけるこうした非定常な可塑化過程については、押出理論をベースにスクリュ軸方向移動項と時間項を組み入れて理論的に解析する手法¹⁾や実験式に基づいたスクリュ設計計算が行われてきた²⁾。しかしながら、射出成形における間欠的な可塑化過程（以下では計量可塑化過程と呼称する）そのものを具体的に捉えた系統的な解析は、これまで行われていなかった。

著者らは前報³⁾において、ガラスインサート構造による加熱シリンダの可視化法に基づき、計量可塑化過程に適用可能な可視化定量解析の手法を新たに提案し、ポリプロピレン（以下PPと略記する）の計量可塑化過程の解析を通してその有効性を実証的に明らかにした。そこで本論文では、同手法の適用を結晶性、非晶性の樹脂へと拡張することとし、標準スクリュによる4種類樹脂の計量可塑化過程を可視化解析し、それらの可塑化状況の比較検討を行った。

^{*1} 日精樹脂工業(株)
長野県埴科郡坂城町南条 2110 (〒389-0693)
Nissei Plastic Industrial Co., Ltd.
2110 Minamijou, Sakaki-machi, Hanishina-gun, Nagano,
389-0693, Japan

^{*2} 東京大学 国際・産学共同研究センター
東京都目黒区駒場 4-6-1 (〒153-8505)
Center for Collaborative Research, The University of Tokyo
4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505, Japan
2000. 8. 11 受理

2. 実験方法

実験方法については前報³⁾と同様とした。射出成形におけるスクリュ動作に追従しスクリュの所定位置におけるペレットの熔融挙動を可視化解析するため、射出成形機 Ti-80 G₂ (東洋機械金属㈱) に可視化加熱シリンダ並びにスクリュ追従撮影装置を設置した。これによりスクリュ圧縮部および供給部におけるペレットの熔融過程を高速ビデオカメラ HSV-400 (㈱ナック) にて撮影した。画像処理は、ID-8000 (同) およびパーソナルコンピュータにより行った。パーソナルコンピュータにおいては、疑似展開画像作成専用プログラムと画像処理用に Paint Shop Pro (Jasc Software Inc.) を用いた。また、画像と共にスクリュ位置・速度・圧力・回転トルクおよびシリンダ内の圧力・温度についても同時に計測することとした。計測システムには MOBAC 220 (㈱ニレコ) を用いた。撮影および計測位置を図 1 に示す。また、使用したスクリュの諸元を表 1 に示す。使用樹脂はポリエチレンテレフタレート (J 025, 三井石油化学㈱, 以下 PET), ポリアミド (2020 B, 宇部興産㈱, 以下 PA 66), 汎用ポリスチレン (2 V, 住友化学工業㈱, 以下 GPPS), ポリカーボネート (L 1250, 帝人化成㈱, 以下 PC) とし、表 2 の条件で計量可塑化実験を行った。なお、実験に際しては各領域での可塑化状況と圧力・温度の同時可視化計測を行ったが、ガラス部材やセンサーの損傷・不具合等を伴いやすい実験のため、以下では必ずしも全てのデータが表示されていないことに注意を要する。

3. 解析方法

実験により得られたビデオ画像より積層疑似展開画像を作成した。さらに展開画像よりスクリュ溝内のソリッドベッド (以下 SB) の幅を算出し、それをスクリュ溝幅で除すことにより SB 比を求めた。SB 比算出方法は前報³⁾と同様とした。ただし、前報の PP 可塑化画像においては SB とメルトプール (以下 MP) を画像上の輝度により判別しており、PA 66 および GPPS においては同手法を適用することが可能であった。しかし、PET の場合は SB と MP の輝度差が小さく、また、PC においては可塑化初期は SB

が MP よりも輝度が高く、その後 SB が低輝度となったため輝度による判別は困難となった。一例として図 2 に PET の疑似展開画像を示す。ここで、ビデオ画像では透明な MP 部はスクリュの溝部曲面を透過するためスクリュ周方向に輝度差を生じ、疑似展開画像上では積層画像間に水平な縞模様を示すこととなる。これに対し、SB 部ではストロボ光の散乱により周方向の輝度差が小さいため、疑似展開画像においては縞模様が表示されない。そこで、以下の手順にて SB と MP を判別した。

- 1) 疑似展開画像に水平方向の輪郭検出処理を施し、MP 部の積層画像の境界線を際立たせる。(図 2-2))
- 2) 適当なしきい値を用いて画像全域を 2 値化する (図 2-3))。
- 3) 同 2 値化画像では SB 部は黒く、MP 部は横方向の白線領域として表示されるので、画像の白線 1 ライン毎に SB 比を算出する。この際、誤差要因となるスクリュ

Table 1 Screw dimension (mm)

Screw diameter : $\phi 36$
Screw pitch : 36
Channel depth : 2.0 (Metering), 4.4 (Feed)
Zone length : 144 (Metering), 216 (Compression), 360 (Feed)

Table 2 Experimental conditions

Cylinder temperature (Nozzle-Front-Medium-Rear 1-Rear 2-Hopper, °C) :
300-300-295-290-280-80 (PET)
300-280-280-280-275-40 (PA 66)
210-210-200-190-190-40 (GPPS)
320-300-295-290-280-40 (PC)
Screw revolution rate (min^{-1}) : 90
Back pressure (MPa) : 6
Charge stroke (mm) : 80
Cooling time (s) : 35 (PET, PA 66)
20 (GPPS, PC)
Pressure holding time (s) : 5
Injection rate (cm^3/s) : 13

Fig. 1 Relationship between screw and cylinder axial coordinates

フライトの影部にはマスクを施す。

4. 実験結果と考察

4.1 PET の計量可塑化過程

図3にSB比および圧力・温度の時間変化を示す。また、図4にPET計量可塑化過程のスクリュ圧縮部 V_1 および供給部 V_2 における疑似展開画像の一部を示す。ここでは、 V_2 における疑似展開画像は輝度による2値化処理を施した画像とし、SBは白く、SB間の空隙は黒く表示されている。併せてフライト部および可視化窓から外れた可視化不能領域を斜線および格子線にて示す。また、図3のSB比にて示された特徴的な変化点A～Eを、図4の疑似展開画像において同時刻のa～eとしてそれぞれ表記することとする。なお、次項以後の解析においても、同様にアルファベットの大字/小文字にて、SB比と疑似展開画像の対応を示すこととする。

図3にて圧縮部 V_1 のSB比は計量前半($t=0\sim11$ s)には0であり、スクリュ溝内はMPで満たされていることが示される。その後Aにてフライト引側にブレークアップ(以下BUPと略記する)したSBがわずかに出現し、SB比が増加しながら計量完了に至る。ここでは図4-1)の疑似展開画像にてBUPを伴うTadmor型の溶融過程が示され、前報のPP計量可塑化に見られたような細分化したBUPは観察されない。一方、供給部 V_2 においては、計量開始時のBにてSB比は小さいものの直後に急増し、Cにて再度低下する。その後SB比は徐々に増加し、Dにてスクリュ溝幅一杯に未溶融ペレットが充填することとなる。さらに、EにてSB比は再度低下を示し、計量完了に至る。ここでは、図4-2)にて計量初期のフライト引側に樹脂の空隙bが存在するが、一時的に溝内はSBが充填し、その後はcにわずかな空隙が生成するものの、スクリュ回転と共に徐々に消失していく。また、図4-3)にてeの空隙が生成している。この空隙は計量完了後の射出工程においてもそのまま残存し、その次の成形サイクルにおける計量工程初期にも引き続き観察される。

ここで、図3のスクリュ速度、トルク、射出/ノズル圧力およびシリンダ内圧力 $P_{C1}\sim P_{C3}$ は共に安定した挙動を示している。また、シリンダ内温度 T_{C1} 、 T_{C2} においては計量初期から中期にかけて緩やかな温度低下を示し、その後一定値となる。 T_{C3} では計量後半のF以後にSB通過による不規則な温度低下が示されている。

4.2 PA 66 の計量可塑化過程

PA 66においては、全ての実験条件においてスクリュ供

給部での可視化ガラスの損傷を伴いやすく、本実験においてもガラス破損を回避することが困難であった。そのため供給部 V_2 は解析不能となり、ここでは圧縮部 V_1 のみの解析を行うこととした。

図5にPA 66計量可塑化過程のスクリュ圧縮部 V_1 におけるSB比および圧力・温度の時間変化を示す。また、図6に疑似展開画像の一部を示す。図5にてSB比は計量初期($t=0\sim7$ s)には0で、スクリュ溝内はMPで満たされている。その後AにてSB比が上昇しているが、これはスクリュ溝内に出現した空隙が疑似展開画像上で暗部となったことによるものである(図6-1)参照)。この空隙はBにて供給部側から溶融樹脂が流入する形態にて消失し、その直後には溶融の進行したTadmor型のSBが観察域に流入し始める(図6-2))。さらにSBはBUPを伴いながらノズル側へと流入するが、Cにて細分化しSB比が低下する(図6-3))。その後D以後はスクリュ溝幅一杯

Fig. 3 Variation of indicated properties with respect to time in the plastification process of PET

Fig. 2 Image processing method for obtaining the solid-bed ratio (Material: PET)

Fig. 4 Extended lamination image of screw channel and its binary image in the plastication process of PET

Fig. 5 Variation of indicated properties with respect to time in the plastication process of PA 66

に広がるSBが流入し、BUPを伴いながら計量完了に至る。このCにおける細分化したSB形態は、前報³⁾のPPにおいても観察されており、計量可塑化過程の特徴的な現象として注目される。

一方、スクリュ回転トルクは計量開始と共に急上昇し、空隙生成後のEより低下を示し、空隙消失とともに再度上昇する。またシリンダ内圧力は空隙生成時には低く、空隙消失と共に上昇する。ここで、スクリュ供給部に相当する P_{c4} は前報³⁾におけるPPの場合と比較してきわめて低いことが確認される。これより、スクリュ供給部溝内におい

てSBがスクリュ表面に付着し、メルトプラグング現象を起こしているものと推察される。さらに、スクリュ回転を継続するうちにメルトプラグングが崩壊し、ホッパ側からの樹脂供給が回復したものと考えられる。

4.3 GPPSの溶融過程

図7にGPPS計量可塑化過程の疑似展開画像を示す。前述の結晶性樹脂では未溶融のSBが不透明であり、透明な溶融領域と明瞭に区別することができた。これに対して、GPPSなどの非晶性樹脂では未溶融時のペレットが透明であり、疑似展開画像にてSBの分布状況を表示できるかが課題となっていた。GPPSを用いた本実験では、図7-2), 3)に示されるように、SB内部ペレット間の界面の存在によりSB領域は白く光って表示されており、非晶性樹脂においてもMPとの識別が可能であることが確認される。なお、著者らのスクリュ溝内樹脂挙動計測時⁴⁾に確認された様に、実際には可視化できない未溶融領域がMPに浮遊しており、これについては本手法での解析は困難であることに注意を要する。

輝度による判別にてこのように算出したSB比を、圧力・温度等と共に図8に示す。圧縮部 V_1 においては計量初期のSB比は0でスクリュ溝内はMPで満たされている。その後AにてSB比が上昇するが、これは溝内に生成した樹脂空隙を示す(図7-1))。この空隙は約1.5 s間にて消失し、その後SB比は0となりスクリュ溝内に溶融樹脂が充満したまま計量完了に至る。

一方、供給部 V_2 においては、樹脂供給の停滞による空隙生成領域は画像上の高輝度領域に対応することとなり、計量初期のBにてSB比が急増し空隙を生成したことを示している(図7-2))。その後Cにて、SBが散在した溶融樹脂がスクリュ溝内に流入し空隙が消失すると、SB比は急激な低下を示す。そしてSBとMPが分離したTadmor型の溶融形態を呈する。さらにD以後はSB比が徐々に増加を示し、E以後はスクリュ溝内をSBが充満したまま計

Fig. 6 Extended lamination image of screw channel in the plastication process of PA 66 (Compression zone V_1)

Fig. 7 Extended lamination image of screw channel in the plastication process of GPPS

量完了に至る (図 7-3))。

ここで、スクリュトルクの変動を見ると、計量初期の空隙発生時はわずかにトルク低下を示すものの、空隙消失時 F にてトルクの極大点が表示される。その後一時的な低下を示すものの徐々に増加し、G 以後はほぼ一定値を示している。また、シリンダ内の圧力は、供給部 P_{C4} にて計量開始時からほとんど 0 であり、空隙が消失する時点 H にて急激に上昇する。これは PA 66 と同様にメルトプラグ現象が生成しているものと考えられる。また、計量部 P_{C1} および圧縮部 P_{C2} 、 P_{C3} では計量開始時には圧力は立ち上がっているものの徐々に低下し、やはり空隙消失時には同時に上昇する。その後各部圧力はフライト通過の周期的変動を伴いながら上昇を示すが、供給部溝内が SB に充満された時点 I にてほぼ一定値となる。また、シリンダ内温度は、圧縮部 T_{C2} 、 T_{C3} では計量開始時に高温部が表示され

るが、空隙の消失とともに温度はほぼ一定値を示す。その後、 T_{C2} において J 以後に SB の存在を示す低温部が観察される。このとき、 T_{C2} に対応する圧縮部 V_1 の SB 比および図 7-1) の画像では、上述した可視化できない SB がなお存在しているものと推察される。

4.4 PC の溶融過程

図 9 に PC の計量可塑性過程における SB 比および圧力・温度等の時間変化を示す。また、図 10 に供給部 V_2 の疑似展開画像を示す。ここで圧縮部 V_1 では、計量・射出工程を通じて SB や空隙は観察されなかった。

図 9 の SB 比では GPPS と同様に計量初期にスクリュ溝内の空隙生成が観察される。この空隙は A にて消失し、フライト引側に SB が観察され、Tadmor 型の溶融過程を示しながら SB 幅は徐々に拡大する (図 10-1))。その後 B にて一時的な SB 比減少と急激な増加が観察される (図

10-2)). 以後CにてSBがスクリュ溝幅一杯に充滿し、そのまま計量完了に至る (図 10-3)).

一方、スクリュトルクは計量開始から他の樹脂と比較して高い値となり、徐々に増加しDにて一定値となる。これはSBが供給部 V_2 に充滿する時点に対応する。また、

シリンダ内圧力 $P_{C1} \sim P_{C3}$ は計量初期には低い値となるが、Eにて急上昇する。これは供給部における空隙消失時点Aに対応することより、ここでも計量初期のメルトプラグが生成しているものと考えられる。また、ノズル圧力に不規則な変動が観察される。上述の各種樹脂においては計量工程中はノズル圧力と射出圧力 (背圧) はほぼ等しい値となるが、PC では射出圧力に対してノズル圧力が不規

Fig. 8 Variation of indicated properties with respect to time in the plastication process of GPPS

Fig. 9 Variation of indicated properties with respect to time in the plastication process of PC

Fig. 10 Extended lamination image of screw channel in the plastication process of PC (Feed zone V_2)

則な低下を見せている。ここで P_{C2} , P_{C3} が非常に高い値を示すことから、そこで発生するスクリュの後退力が、ノズル圧力の低下を引き起こしているものと推察される。

4.5 計量可塑化過程における溝内空隙生成過程

上述の結果より、各種樹脂の計量可塑化過程において、計量初期のスクリュ溝内が一時的に未充填となり空隙を生成する特徴的な現象が、共通して確認された。この空隙生成過程は以下のようにモデル化される。

図 11 に計量開始時のスクリュ溝内可塑化状況を示す。射出工程に引き続く待機中において、スクリュ各部の溝内樹脂は、シリンダ壁面からの伝熱により溶融が徐々に進行している。そのため計量開始時の圧縮部入口（図 11-A）では、SB 周囲を MP が広く取り囲む溶融形態となる。一方、射出終了後の待機時に未溶融の SB に満たされていた圧縮部側の供給部溝内（図 11-B）では、ペレットとシリンダ壁面との接触部を中心にメルトフィルム状の溶融層が次第に生成される。また、よりホッパ側の供給部溝内（図 11-C）では、もともと低温の未溶融ペレットに満たされ

ていることに加え、伝熱量も溶融層を生成するには不十分で、未溶融ペレットが充満した形態にとどまっている。さらに後方のホッパ近傍では、射出によるスクリュ移動の際にホッパ口から落下・供給されたペレットがスクリュ溝内に充満している。そのため、計量初期にはペレット間に隙間が多く介在し、低いかさ密度のまま溝内を充填したものとなる。

この A, B, C 各領域のペレット群および樹脂について、計量開始後にどのように挙動するかを図 12 に簡略化して図示する。図 12-1) にて計量を開始すると、領域 A では、押側フライトの掻き取り効果により溶融樹脂はノズル側へと輸送され、SB もこれに追従して移動する。一方、領域 B においては、シリンダ壁面近傍の溶融層が潤滑剤の役割を果たし、シリンダ壁面と SB の間にスリップ現象が生成する。このため SB はスクリュ溝に張り付いた状態でノズル側へは輸送されない、いわゆるメルトプラッキング現象を呈することとなる。したがって図 12-2) に示すように両者のスクリュ溝間には溶融樹脂の飢餓状態が生じ、

Fig. 11 Progression of the melting process due to the heat-conduction during the waiting process

Fig. 12 Schematic process of resin transfer along the screw axial direction during the charging process

空隙 D が生成することとなる。このとき、領域 C のペレット群ではスクリュ回転によりペレット間の隙間が圧縮されながらノズル側への移動を開始する。その結果、メルトフィルムの潤滑効果により SB が移動しない上述した滞留領域においても、ホッパ側からノズル方向への SB 押し込み作用により、樹脂は再びノズル方向へと移動を開始する。やがて空隙は MP と SB に満たされて消滅するものと推察される (図 12-3))。

また PET においては、計量初期の空隙が生成した後、再度スクリュ供給部に空隙の生成が観察された。同様の空隙生成は、ポリブチレンテレフタレート (PBT) の計量可塑化過程において噛み込み不良現象としてすでに解析されており⁵⁾、ポリエステル系樹脂に特徴的な以下の現象によるものと推察される。すなわち、供給部 V_2 よりホッパ側においては計量初期にメルトフィルムが存在する。その後ホッパ側から加熱不十分なペレットが供給されるに伴いメルトフィルムは徐々に減少し、計量後半には樹脂ペレットの摩擦による輸送現象に置き換わることとなる。同時にスクリュもシリンダ内を後退するため、可視化領域よりもさらにホッパ側ではスクリュ表面温度がシリンダ壁面温度よりも高温となるものと考えられる。ここで、樹脂の摩擦特性を反映してペレット-金属間の摩擦係数がシリンダ壁面よりもスクリュ壁面部にて一時的に大きくなる結果、固体輸送が滞ることとなる。そのため、図 3, 4 における E 部あるいは e 部の空隙生成に至ったものと推察された。

5. 結 言

可視化加熱シリンダとスクリュ追従撮影装置により射出成形に対応する計量可塑化過程を可視化し、PET, PA 66, GPPS, PC のスクリュ圧縮部および供給部溝内溶融状況を解析した。実験・解析結果から得られた結論を以下に列記する。

(1) 上記樹脂におけるスクリュ溝内溶融挙動の時間変化を、積層疑似展開画像と画像から求めたソリッドベッド比により具体的に明らかにした。樹脂固有の可塑化過程を示

すと共に、各樹脂に共通して計量初期のスクリュ供給部溝内に一時的に空隙が生成し、その後消失する現象を明らかにした。

(2) 計量初期の空隙生成は、供給部溝内の一部で待機時間中の溶融進行によりメルトプラグ現象が生成し、そのメルトプラグ領域よりノズル側で過渡的な供給不足がもたらされたものと推察した。さらに、よりホッパ側に位置する隙間の多いペレット群が、スクリュ回転の継続により次第に圧縮されつつメルトプラグ領域をノズル側へと押し流すことにより、空隙が消失するものと推察した。

(3) PET においては、計量後期においても供給部溝内未充填現象が生成することを明らかにした。これはスクリュ後退によりシリンダ後部領域においてスクリュ表面温度が相対的にシリンダ内壁面より高くなる領域が現れ、ペレット-金属間の摩擦係数がシリンダ壁面よりスクリュ表面にて大きくなり、固体輸送が滞ったものと推察した。

今後はさらにスクリュ形状を変更し、またスクリュ溝内のペレット移動現象をマーカー追跡手法により数値化することなどにより、より詳細な検討を行うことが期待される。

なお、本研究は東京大学生産技術研究所の平成 4 年度, 5 年度民間等との共同研究-V'92&V'93 プロジェクトおよび平成 6 年度, 7 年度民間等との共同研究-V'94&V'95 プロジェクトにより遂行されたものであることを記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Rauwendaal, C. J.: *Internal Polymer Processing*, VII, 26 (1992)
- 2) 数面博義: 成形加工, 9(1), 65 (1997)
- 3) 横井秀俊, 龍野道宏: 成形加工, 11(11), 922 (1999)
- 4) 横井秀俊, 黒田章公: 成形加工 '95, 163 (1995)
- 5) 横井秀俊, 高次聡: 成形加工, 12(7), 457 (2000)