

研 究 解 説

押出成形と射出成形における可塑化過程モデル

Plastication Process Models for Extrusion and Injection Molding

龍 野 道 宏*・横 井 秀 俊**

Michihiro TATSUNO and Hidetoshi YOKOI

1. は じ め に

プラスチック成形加工の主要なプロセスとしては、押出成形、射出成形、ブロー成形、カレンダー成形などが挙げられる。これらは共通して、プラスチックを一旦可塑化してその後賦形する加工法である。また、原材料のプラスチックには、加熱により可塑化を行うことのできる熱可塑性樹脂が最も一般的に使用されているが、これらは断熱材として機能するほど熱伝導率が低いため、本質的に熔融・可塑化しにくい特性を持っている。そのため、最も重要な成形法である押出成形と射出成形においては、図1のような単軸スクリュ可塑化機構が多く使用されている¹⁾。ここでは、周囲にヒータを配置した加熱シリンダ内にスクリュが挿入されている。そのスクリュを回転することにより、ホッパーから供給されたペレット状の固体樹脂がノズル側へと輸送される。その過程において、ヒータからの伝熱に加えて、摩擦・せん断などの機械的エネルギーが効率よく付与されることにより、固体樹脂は熔融し可塑化されていく。この可塑化過程は、可視化実験に基づいたモデル化が試みられ、①固体輸送ゾーン、②熔融ゾーン、③溶融体輸送ゾーンの連続した3つの領域に分けて解析されてきた。

①固体輸送ゾーン；固体樹脂はシリンダ・スクリュの金属壁面との摩擦により輸送される。固体材料を一体のプラグとするなどの仮定のもとに理論解析されているが、固体プラグ内での個々のペレット挙動や内部せん断発熱による昇温、さらには摩擦係数の温度依存性などが課題となっている。さらに、シリンダのヒータ加熱領域に達すると、固体プラグ周囲にフィルム上の溶融層が形成され、固体輸送に関わる力が摩擦力から粘性せん断力へと変化し、溶融遅延ゾーンとして解析モデルが変化する。

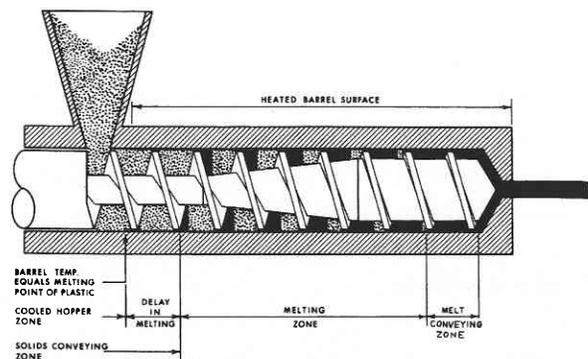
②熔融ゾーン；溶融樹脂量が増加しメルトプール (Melt pool; 以下 MP と略記する) を形成すると共に、固体樹脂

が一体化しソリッドベッド (Solid bed ; 以下 SB と略記) を形成する。この溶融ゾーンに関しては、多くの研究者により様々な理論モデルが提案されている。

③溶融体輸送ゾーン；このゾーンはニュートン流体の解析として古くから理論化され検討が進められてきた。近年にいたっては非ニュートン流体の3次元流動解析が行われ、顔料やフィラーの分散過程などのシミュレーションが実施されてきている。

これらの各ゾーンに対応してスクリュの設計がなされている。一般的なスクリュ形状は、固体輸送ゾーンに対しては一定の溝深さ (供給部) とされ、溶融ゾーンでは溝深さを徐々に浅くしたテーパ状 (圧縮部) に、溶融体輸送ゾーンでは一定の溝深さ (計量部) とされている。ここでは、各種樹脂や運転条件に対してスクリュ形状を最適化することが、成形加工の生産性向上のために重要であり、そのために各条件に対応した可塑化過程の解析が必要となっている。

ここで、押出成形は、連続的にスクリュを回転し樹脂を可塑化する成形法であり、基本的には定常現象として扱うことができる。そのため、理論解析のモデル化が容易で、実際の成形現場でも適用できる CAE の技術が大きな発展を遂げてきた²⁾。しかしながら、溶融ゾーンにて SB が分

図1 単軸スクリュ可塑化機構¹⁾

*日精樹脂工業 (株)

**東京大学国際・産学共同研究センター

断するブレイクアップ (Break-up ; 以下 BUP と略記) 現象などの過渡的現象については、未解明の課題が残されている。

これに対し射出成形における可塑化過程は、スクリュが間欠的に回転し、軸方向にも往復動作することによる過渡的で周期的な現象が重畳されるもので、本質的に非定常現象である。そのため、定常現象を取り扱う押出成形理論の適用は困難で、過渡的現象を的確に捉えた実験解析に基づく新しい理論解析が必要となっている。しかしながら射出成形は、樹脂の融点を超える高温や、100 MPa 以上の高圧の環境下で行われるため、外部からの観察には困難が伴っており、現象の可視化解析手法の開発が大きな課題となっていた。

本稿では、はじめに加熱シリンダ内現象の可視化解析手法の概略を紹介する。さらに、最も複合的で本質的に多くの課題を含んでいる熔融ゾーンでの現象に焦点を絞り、押出成形に関する可塑化過程のモデル化研究について解説する。その上で、現在でも未解明とされている BUP などの押出成形における非定常現象、さらに射出成形の可塑化過程に関する研究について順次解説する。

2. 加熱シリンダ内現象の実験解析手法

2.1 静的可視化手法

はじめに加熱シリンダ内現象の可視化実験解析法の概略について紹介する。これらの詳細に関しては、既報の解説³⁾等を参照されたい。図2に各種可視化手法を一覧して示す。1950年代から静的可視化手法が Maddock⁴⁾、Street⁵⁾らにより提案され、実施されてきた。これは、押出成形中のスクリュ・加熱シリンダに通水し、可塑化状況を急冷・凍結した後、スクリュを引き抜き、スクリュ溝に巻きついた樹脂サンプルを取り出して解析する方法である。図3にスクリュ溝横断方向の断面を切り出したサンプルの例を示す。ここでは、樹脂に顔料や着色ペレット等を混入することで熔融部を着色し、未熔融部との判別を容易にしている。また、加熱シリンダを分割構造として、冷却・凍結後のサンプル取り出しを容易にするなどの工夫も行われている。使用する実験装置としては比較的簡便である上、スクリュ溝深さ方向の情報を得るにはこの手法に限られるため、重要な方法である。しかしながら、熔融サンプルの解析には煩雑で多大な作業が必要であり、静的な情報しか得られないという欠点と併せて、多くの実験を必要とする過渡的現象の時系列解析にはとりわけ不十分な方法であると考えられる。

2.2 動的可視化手法

加熱シリンダ内を動的に可視化する手法としては、1950年代に透明シリンダに模擬流体を用いる方法が行われ、溶融体輸送ゾーンに対応するスクリュ溝内流動の解析が行わ

れた⁶⁾。その後、熔融ゾーンにおける実際の樹脂可塑化状況を観察するため、加熱シリンダに高耐圧のガラスをインサートする手法が検討され、1970年代よりアーヘン工科大学プラスチック加工研究所 (IKV, ドイツ) により実施されたとされている⁷⁾。その後、伊藤⁸⁾、田村ら⁹⁾により円形可視化窓を用いた部分的な可視化方法が提案された。さらに、Zhu らは長円形可視化窓を多数設置して観察範囲を拡大し、押出機における可塑化過程の観察により、SB の

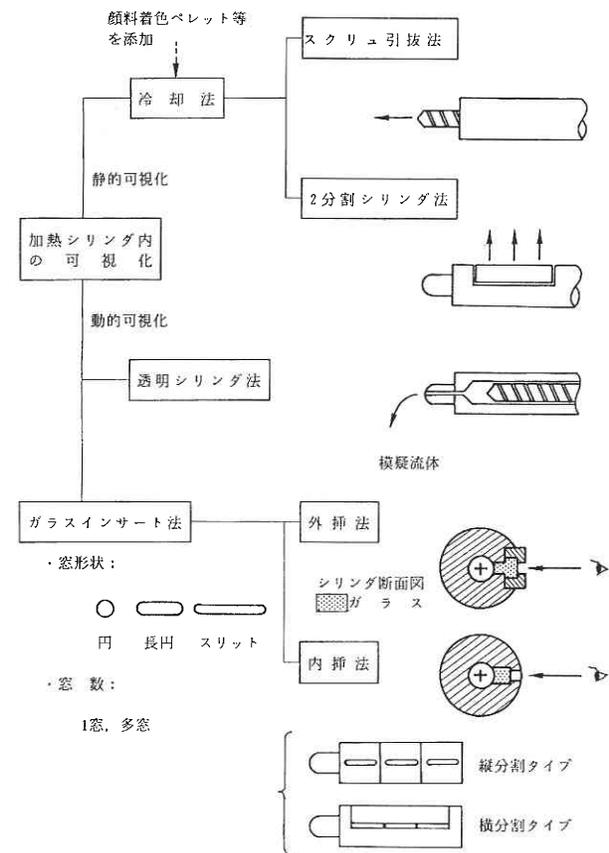


図2 加熱シリンダ内部の各種可視化手法³⁾

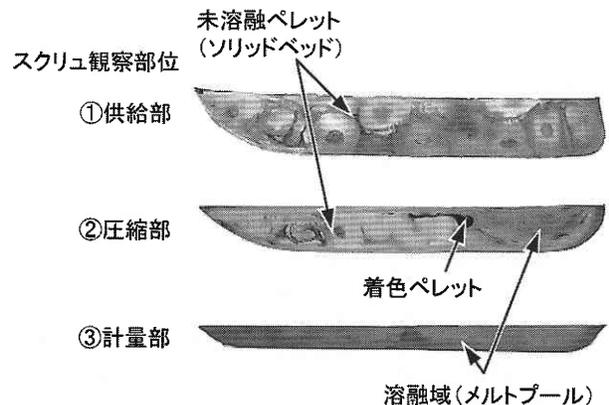


図3 静的可視化による加熱シリンダ内溶融サンプル

移動速度の計測や固体ペレットの移動状況解析などを実施した¹⁰⁾。

これに対し著者らは、ガラス内挿法によりガラス取り付け部領域を極限まで低減し、射出成形の高圧に耐える可視化シリンダを開発した^{11,12)}。図4にガラス内挿可視化加熱シリンダの構造を示す。ここでは、加熱シリンダを軸方向に分割し、石英ガラスブロックを内挿する構造とした。これにより高い耐熱・耐圧性を確保すると共に、軸方向の可視化範囲を広く取ることが可能となった。しかしながら、ガラス内挿構造に起因して観察窓の幅が6 mm と狭

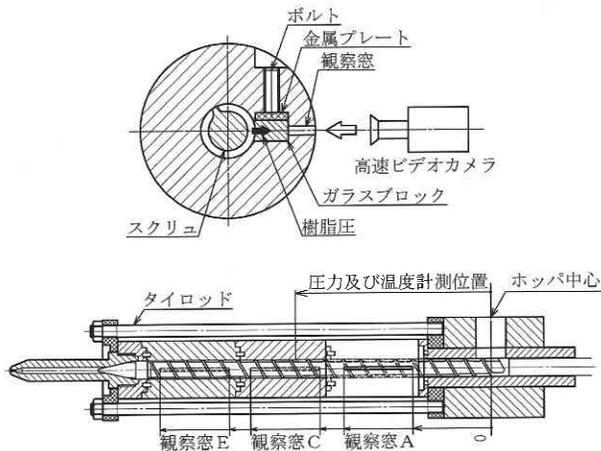


図4 ガラス内挿方式による可視化加熱シリンダの基本構造³⁾

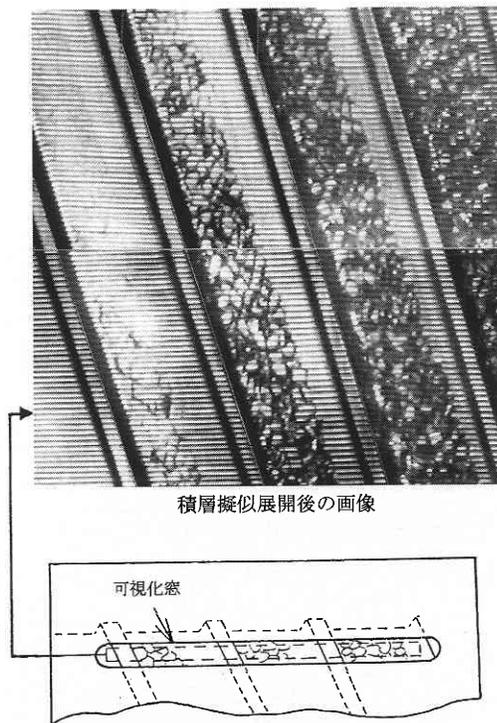


図5 擬似展開画像の作成¹³⁾

くなり、可視化範囲が制限されることとなった。そこで図5のように、高速ビデオカメラにより拡大撮影した画像の中から、観察窓部分のみの画像をスリット状に切り取り、時系列的に積み上げることにより、スクリュの積層擬似展開画像を作成する手法を提案した¹³⁾。同図の縦軸は経過時間に対応する。すなわち、この画像はスクリュ溝内のSB形態を明瞭に示すと共に、樹脂溶融過程の時間変化をも示すものであり、同時に計測した圧力・温度との相関解析がこれによりはじめて可能となった¹⁴⁾。以上の手法により、押出成形の定常的な可塑化過程のみならず、BUP現象などの非常常現象や射出成形での計量可塑化過程についても解析を実施している。

3. 押出成形における可塑化モデル

3.1 代表的可塑化モデル

前章で述べた手法などにより、各種サイズの押出機や様々な樹脂について実験解析が実施され、シリンダ内の可塑化過程の観察に基づいた様々な可塑化モデルが提案されてきた。代表的なモデルとして以下の3つがあげられる。なお、各モデルのスクリュ溝横断面の説明図においてフライトの進行方向の表記が交錯しているため、本稿ではスクリュ溝を基準としてホッパー側のフライトを押し側フライト (Pushing flight)、ノズル側のフライトを引側フライト (Trailing flight) と定義し、各図に注記として追加することとする。

1) Maddock-Tadmor モデル

Maddock⁴⁾、Street⁵⁾らの静的可視化実験結果を元に、Tadmorらにより数式化された可塑化モデルの概念図を図6に示す^{15,16)}。未溶融樹脂ペレット群はスクリュ溝内を移送される過程で圧縮され、一体となったSBを形成する。このSBは加熱シリンダ壁面にて溶融し、メルトフィルム (Melt film; 以下MFと略記) を形成する。このMFはスクリュフライトにより掻き取られ、フライト押し側にMPを

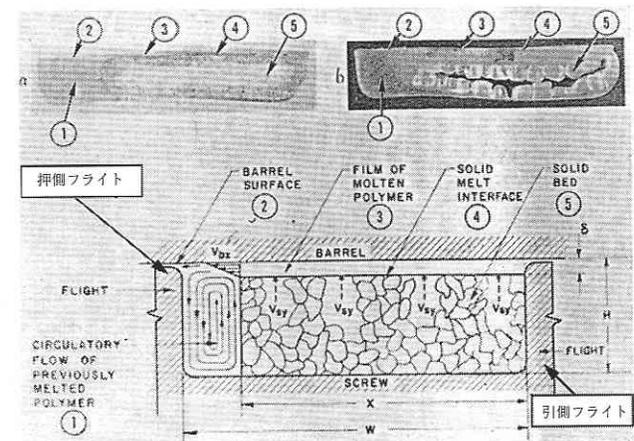


図6 Maddock-Tadmorの溶融モデル¹⁶⁾

形成する。このMPの圧力によりSBはフライト引側に片寄りとなり、溶融進行によりMPが拡大すると共にSB幅が圧縮されていくものとした。このように、スクリュ溝内を、SB、MP、MFの3ゾーンに区分したモデルは、最も一般的な可塑化モデルとして、その後多くの研究者によって発展的に解析されている。

2) Dekker-Lindt モデル

図7にDekker¹⁷⁾の実験結果より、Lindt¹⁸⁾が理論化したモデルの概念図を示す。SBはシリンダ側とスクリュ側の溶融樹脂フィルム間に浮遊し、SB周囲を溶融樹脂が回流するモデルである。Maddockらの実験に対し、より大型の押出機(スクリュ径90mm)にて観察された。このモデルに関しては、後にElbirli, LindtらによってMaddock-Tadmorモデルと統合したモデルが提案されている¹⁹⁾。

3) Menges-Klenk モデル (Cox モデル)

図8にMengesとKlenk²⁰⁾が粉体塩化ビニルの可塑化実験に基づき提示したモデルの概念図を示す。Maddock-Tadmorモデルとは逆にフライト引側にMPが形成され、SBはフライト押側に片寄っている。これは、シリンダ壁面にて生成した溶融樹脂が、押側フライトに掻き取られずに1ターン分ホッパー側の隣接スクリュ溝内に侵入するためと推察した。また、同様の溶融形態がCoxらにより粉体の低密度ポリエチレンにて観察された²¹⁾。ここでは、粉体樹脂が柔軟なSBを形成し、SBがシリンダ壁面部にてフライト押側へ牽引され、フライト引側に溶融層が形成さ

れたものと推察している。

3.2 静的可視化手法による可塑化モデル

前節にて述べた可塑化モデルの中で、最も一般的に観察されるのがMaddock-Tadmorのモデルであるが、その後静的可視化により多くの現象が明らかにされ、理論解析が展開されている。

Maddock-Tadmorの3ゾーンの溶融形態に対し、EdmondsonらはSBのスクリュ側にも溶融フィルムが存在することを指摘し、新たな可塑化モデルを提案した²²⁾。ここでは、スクリュ温度の上昇に伴い、SBのスクリュ側にも溶融層(Melt layer; 以下MLと略記)が形成され、ここでの溶融樹脂はMPへ集積することなく溝進行方向に移動するものとした。さらにShapiroらは図9に示す5ゾーンモデルを提示し、詳細な理論的解析を行った²³⁾。ここでもMLをSB移動に対するスクリュ表面上の潤滑層として扱い、スクリュ側MLとシリンダ側MFやMPとの間に物質移動は無いものと仮定している。このMLについて、深瀬らは溝深さ一定のスクリュを用いた実験により、SB幅と厚さがほぼ同一速度にて減少しML厚さが拡大すること、ML圧力に加えてMFよりMPへ溶融樹脂が流出することによる負圧の生成とがSBをシリンダ側へと押し上げることが明らかにした^{24,25)}。すなわち、Maddock-Tadmor型のSBとスクリュ溝底面間に溶融樹脂が侵入する可塑化モデルを提示した。さらに溝深さが変化するスクリュでは、圧縮部にて溝深さが浅くなる過程でSBとスクリュ溝底面が干渉し、ML厚さが薄くなることを明らかにしている。これらの結果より、ML-MP間の溶融樹脂流動を考慮した解析モデルを提示した。

また、Maddock-TadmorモデルではSBは変形せずに溝方向移動速度は一定としていたが、DonovanはSBが溶融

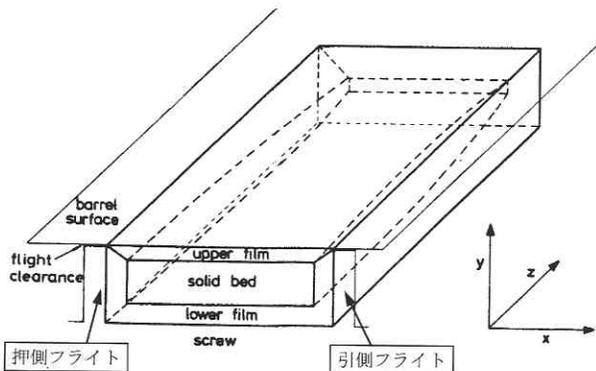


図7 Dekker-Lindtの溶融モデル¹⁸⁾

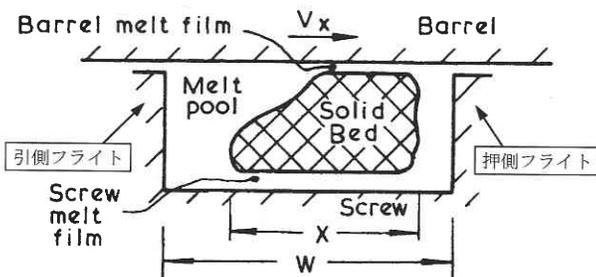


図8 Menges-Klenkの溶融モデル (Coxの溶融モデル)²¹⁾

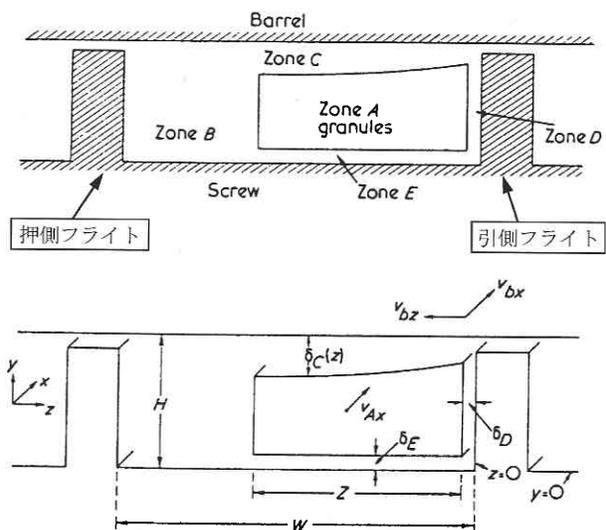


図9 Shapiroの溶融モデル (5ゾーンモデル)²³⁾

進行と共に変形・加速するとして、経験的なパラメータを導入した²⁶⁾。さらに Edmondson らは、取り出した樹脂サンプルのシリンダ側表面に形成された擦傷の角度より SB の移動速度を実測した²²⁾。ここで、SB 速度は加速しており、その際、スクリュ側に ML が生成すると共に SB が分断する BUP 現象が生成することを明らかにした。一方、前掲の深瀬らは、通常の樹脂をホッパーから供給すると共に、ホッパーに挿入した細管よりカラーペレットを供給し、カラーペレットの移動距離からペレット速度を計測した²⁵⁾。これによるとスクリュ側の溶融層が存在すると SB 速度は一定値を保ち、スクリュ圧縮部にてスクリュ溝が浅くなり、スクリュ側溶融層が消失すると、SB が変形して加速するとした。

以上の解析を総合して、Elbirli, Lindt らは詳細な理論解析を提案した¹⁹⁾。ここでは図 10 に示すような 5 ゾーンモデルであるが、SB の変形と SB 周囲に溶融樹脂の循環流れを導入した。これにより、前述の Dekker-Lindt モデルと Maddock-Tadmor モデルとは統合されたものと考えられる。さらに、SB の変形・加速及び SB 周囲の循環流れの有無

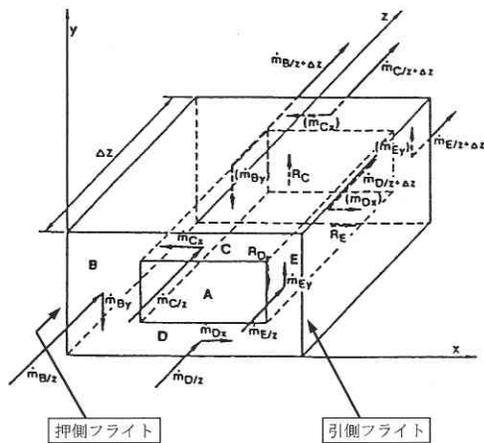


図 10 Elbirli-Lindt の溶融モデル¹⁹⁾

の各モデルについて、シミュレーションと実験結果の比較を実施した。その結果、SB 変形がなく循環流れがあるモデルが、SB 幅とシリンダ内圧力分布の実験結果に最も近似するものとした。

これに対して、Lee, Han らは、供給部と圧縮部が短いスクリュを用いた実験により、圧縮部にて SB とシリンダ・スクリュ壁面が干渉を起こす場合には、SB 変形と加速を無視できないと指摘し、SB 変形に作用するみかけ応力のパラメータを導入した^{27,28)}。このパラメータは、SB の変形・加速の度合いを示すもので、ペレット形状や、圧力・温度などの可塑化条件により異なるものとした。スクリュ軸方向の圧力分布の実験結果とシミュレーションとを比較することにより、このパラメータを最適化することが必要としている。

以上の各可塑化モデルの特徴を、表 1 に一括して比較する。同表に示されるように、加熱シリンダ内の可塑化過程モデルについては、スクリュ側の溶融層の存在などによるモデルの領域数、SB 周囲の溶融樹脂回流、及び SB の変形に伴う移動速度の変化、さらには SB の BUP 現象などが解析上の主要な課題となっていた。これらの解析を進める上では、樹脂可塑化過程を動的に可視化した実験による解析が併行して進められてきている。以後にその概要を紹介することとする。

3.3 動的可視化手法による可塑化モデル

著者らはガラスインサート可視化加熱シリンダによる動的可視化により、各種樹脂、スクリュ形状、さらにはペレット形状による可塑化状況を解析し、静的可視化にて未解明の課題に取り組んできた。可塑化モデルに関しては、前述の図 5 のような積層擬似展開画像により、可視化シリンダ内の可塑化過程を具体的に明らかにし、スクリュ各部において可塑化モデルが変遷することを示した^{13,29,30)}。すなわち、スクリュ溝内の SB は①ペレットが相互に拘束し合い外力によって SB 内で容易に再配置できない状態から、

表 1 加熱シリンダ内可塑化モデルの比較

可塑化モデル	ゾーン数	溶融樹脂 回流	SB の 変形・加速	備考
Maddock-Tadmor ^{15), 16)}	3	×	×	3 ゾーンモデル
Dekker-Lindt ^{17), 18)}	5	○	×	溶融樹脂の回流
Menges-Klenk ²⁰⁾	—	×	×	粉体塩化ビニルの可塑化
Donovan ²⁶⁾	3	×	○	SB 加速パラメータの導入
Cox-Williams-Isherwood ²¹⁾	5	×	○	Menges-Klenk モデルの再現
Edmondson-Fenner-Cox ²²⁾	5	×	○	5 ゾーンモデルの提示
Shapiro-Halmos-Pearson ²³⁾	5	×	○	5 ゾーンモデルの詳細解析
Fukase-Kunio-Shinya-Nomura ²⁵⁾	5	○	○	ML-MP にて樹脂移動
Elbirli-Lindt ¹⁹⁾	5	○	○	5 ゾーンモデルにて溶融樹脂回流
Lee-Han ²⁷⁾	5	○	○	SB 変形に関するみかけ応力

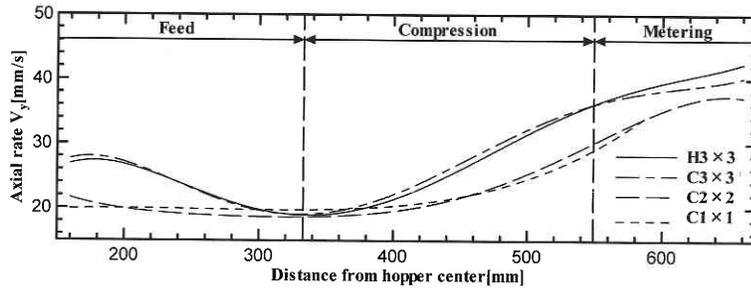


図11 ペレットの軸方向移送速度に対するペレット形状の影響³²⁾

②溶融が進んだペレット間を溶融樹脂が十分に満たし相互に移動できる状態を経て、③フィルム状に広く薄く引き伸ばされた形態をとることを報告した。そして、①では Maddock-Tadmor 型 (3ゾーン型) または Shapiro 型 (5ゾーン型)、②以降 MP から SB-スクリュ間に溶融樹脂が侵入した侵入型から SB 周囲を溶融樹脂が回流する Dekker-Lindt 型 (回流型) へと変遷するモデルを提示した。このように可塑化モデルが変遷することについては、Elbirli, Lindt らのモデル¹⁹⁾を適用することがある程度は可能であると考えられるが、現実には、樹脂、ペレット形状、スクリュデザイン、温度、スクリュ回転数など様々な要因が絡み合うものとなっているため、理論的解析に先立って、さらなる実験解析が必要であろう。

3.4 ソリッドベッド移動速度の解析

著者らは、高速ビデオによる可視化画像から、ペレット 1 回転に要する時間とスクリュ軸方向移動距離を計測し、SB の移動速度を算出した^{31,32)}。図 11 に PP 可塑化過程における SB の軸方向移動速度に対するペレット形状の影響を示す。ここでは、直径・長さをそれぞれ 1~3 mm としたコールドカットペレット (C1*1~C3*3 と略記する) と直径 3 mm のホットカットペレット (H3*3 と略記) を用いている。大型の C3*3 と H3*3 のペレットは、供給部における初期速度が大きく、圧縮部入り口にてより小型のペレットと同等の速度となっている。これは、ホッパーから供給された大型ペレットはスクリュ溝充填時の溝体積当たりの空孔率が大きく溶融進行によるかさ密度の変化速度が大きいこと、一方、圧縮部入口にて空孔率がいずれもほぼゼロとなったためそれ以降は各ペレットとも同等の移動速度を示したものと考えられる。また、各ペレットとも圧縮部において SB が加速しているが、大型ペレットでは加速の度合いが大きい。これは以下の可塑化モデルの相違に起因している。すなわち小型ペレットは Maddock-Tadmor 型の可塑化モデルを示し、BUP は生成せず SB の連続性が保たれている。一方、大型の C3*3, H3*3 では SB 内部に溶融樹脂を含浸した Dekker-Lindt 型の可塑化モデルをとり、BUP が頻繁に生成している。ここでは、明瞭な MP は形成されずに SB 分断片間に溶融樹脂を抱きこむ状態で樹脂が

ノズル側へと移動し、結果として SB 速度は著しく上昇したものと考えられた。

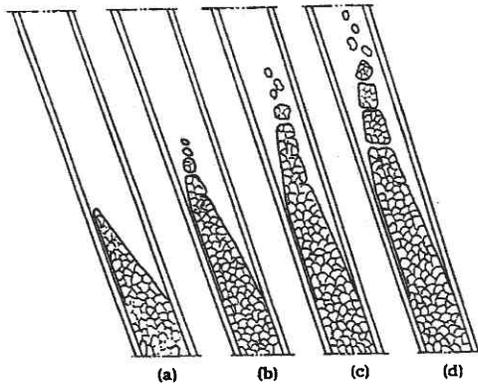
また、樹脂系を変更した場合に、供給部においてペレット凝集過程の相違により SB 速度が異なること、Dekker-Lindt 型可塑化モデルにおいて SB が引き伸ばされ、Maddock-Tadmor 型可塑化モデルの場合よりも SB 速度が大きく加速されることなどを明らかにした³³⁾。

このように、SB 移動速度に対しては、可塑化モデルと共に BUP 現象が支配因子として重要であり、それらの現象の解明が求められている。

4. ブレークアップ現象の解析

前述の課題の中でも BUP 現象は、定常的な溶融モデルから外れた現象である上に、溶融樹脂温度の変動や色むらなどの可塑化過程の不安定要因と考えられ、その生成機構の解明が求められていた。

Edmondson, Fenner, Cox らは、静的可視化手法により、BUP 生成部においては SB のスクリュ側に ML が生成し、SB 移動速度が加速することを示した^{22,34,35)}。また、可塑化過程でスクリュを冷却することにより SB 加速と BUP 生成が抑制されることも示した。しかしながら、静的可視化では非定常現象である BUP 生成状況を正確に計測することは困難であった。これに対し、Zhu らは動的可視化手法により、図 12 のように BUP 生成状況を観察した¹⁰⁾。また、溶融過程の観察と共に SB 速度を算出し、上記と同様に SB 加速と BUP 生成とが対応すること、スクリュ冷却により BUP が抑制されることを確認した。以上の研究においては、当該条件における BUP 生成状況を示すにとどまっておらず、具体的な生成機構の提示までには至らなかった。そこで、著者らはガラスインサート可視化加熱シリンダを用いた実験により、各種樹脂の可塑化過程における BUP 現象の生成過程と圧力変動の対応を具体的に明らかにした^{14,36,37)}。図 13~15 に BUP 生成時の擬似展開画像と圧力の関係を示す。図 13 は標準スクリュの圧縮部におけるポリプロピレンの可塑化状況であり、BUP 生成時の圧力はフライト通過に伴う周期的変動を示している。これは、SB の溶融末端にて周囲の溶融樹脂流動に SB が引き伸ばさ

図12 ブレークアップ生成状況のスケッチ¹⁰⁾

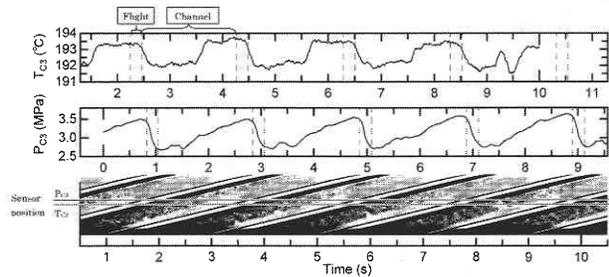
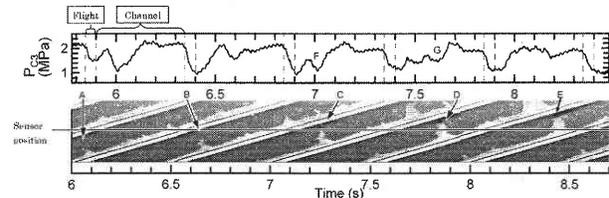
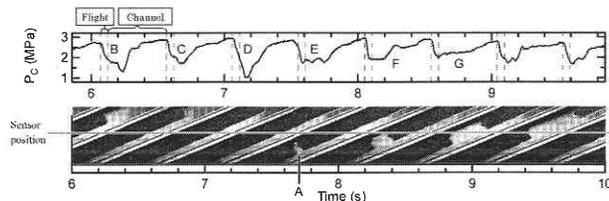
れ、破れが生成したものと考えられる。また、図14は標準スクリュの圧縮部におけるポリアミドの可塑化状況であり、BUP生成時には圧力変動の周期性が失われ、BUP部Fにおいて両側のSB部よりも圧力が低下している。これは、スクリュ溝の浅底化に伴い、SBがシリンダ・スクリュ壁面に狭持され、圧壊しているものと考えられる。一方、図15は急圧縮スクリュの供給部の場合であり、BUP生成時の圧力は周期的変動を示している。ここでは、SBと壁面との干渉は起こらず、溶融樹脂からSBにかかるせん断力が増加して破れが生成したものと考えられる。これらの結果に静的可視化によるスクリュ溝深さ方向の観察結果を総合して、以下の3種類のBUP生成モデルを提示した。

[モデルⅠ] 溶融が進み厚さが減少したSBが溶融樹脂の流動により引き伸ばされ、SBに破れが生成する。

[モデルⅡ] スクリュ溝深さが減少する圧縮部において、スクリュ・シリンダ壁面と未溶融ペレット塊のSBが強い干渉を引き起こした場合、浅底化に沿うスクリュ表面速度上昇及びSBとスクリュ・シリンダ壁面との間のせん断速度増加に起因して、干渉域のSB内に大きな引張力を生成し、SBに破れを生成する。

[モデルⅢ] 溶融樹脂がSBとスクリュ表面との間に侵入する侵入型溶融形態にあるSBにおいて、SBとスクリュ壁面間のML圧力によりSBがシリンダ壁面へと押し上げられ、SBとシリンダ壁面間のせん断力増加に起因して、SB内に大きな引張り力が生成し、SBに破れ(ブレークアップ)が生成する。

以上の3種類のBUP生成モデルは、SBの溶融形態がMaddock-Tadmor型(3ゾーン型)、Shapiro型(5ゾーン型)、さらに溶融が進行した侵入型、そしてDekker-Lindt型(回流型)へと遷移するそれぞれの可塑化過程に対応している。Maddock-Tadmor型とShapiro型SBがスクリュ圧縮部に達した場合にモデルⅡのBUPが生成するのに対し、侵入型SBではモデルⅢのBUPが、またDekker-Lindt型SBではモデルⅠのBUPが、可塑化条件によりスクリュ各部

図13 モデルⅠのブレークアップ生成過程³⁶⁾図14 モデルⅡのブレークアップ生成過程³⁶⁾図15 モデルⅢのブレークアップ生成過程³⁷⁾

においてそれぞれ生成するものと推察される。

5. 射出成形における可塑化モデル

5.1 静的可視化手法による解析

前章までの溶融モデルは、いずれも押出機における定常的な可塑化過程を取り扱っている。一方、射出成形では可塑化は間欠的に行われ、可塑化過程は本質的に非定常となる。また、スクリュが前進・後退するのに伴い、スクリュと加熱シリンダとの相対位置が常時変化して、可塑化過程は成形サイクルに対応して周期的に遷移する。この計量可塑化過程についてDonovanらは図16のように静的可視化実験により計量開始時と計量終了時での溶融過程を可視化し、SB幅の軸方向分布について、押出時に対する計量可塑化時における近似式を提案した^{38,39)}。さらに、Tadmor, Lipshitzらは過渡的押出モデルを提案し、射出成形に適用した理論的考察を提示した^{40,41)}。ここでは、図17のように連続押出時のSB幅の軸方向分布が、射出成形サイクルの繰り返しにより変遷するモデルを提示した。しかしながら、非定常現象である射出成形過程に対して静的可視化実験を適用し解析することは本質的な限界があり、その後の実験による理論解析の検証は十分に行われなかった。そのため、

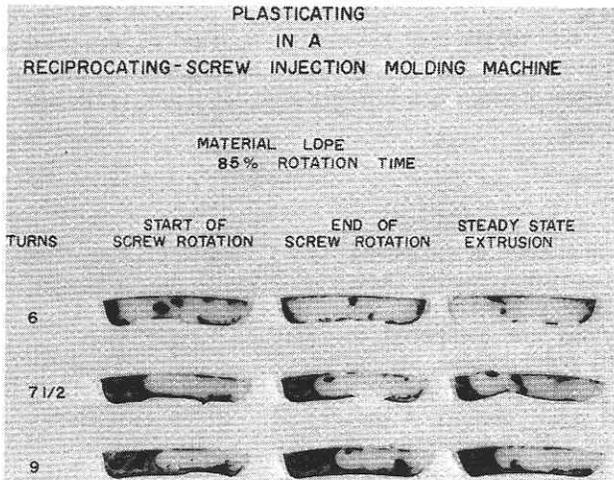


図 16 計量可塑化過程と連続押出時のシリンダ内溶融現象の比較³⁸⁾

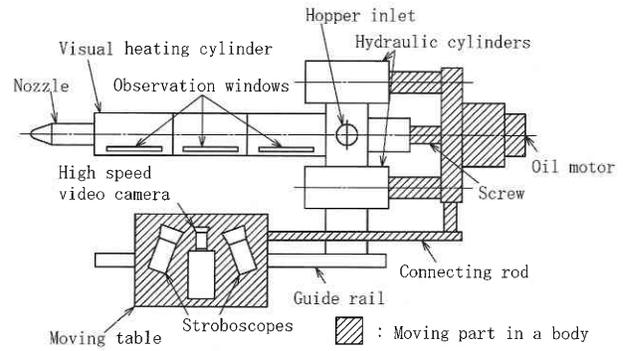


図 18 スクリュ追従撮影装置⁴¹⁾

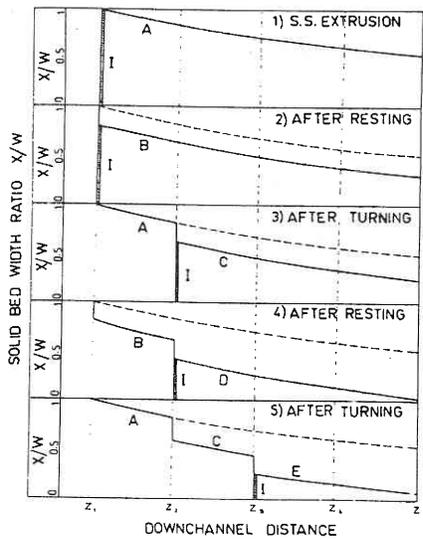


図 17 計量可塑化時の溶融モデル⁴⁰⁾

1974 年以後は解析が進捗しなかったものと考えられ、動的可視化による解析手法の確立が求められていた。

5.2 動的可視化手法による解析

そこで、著者らは、射出成形の高圧に耐えることのできるガラスインサート可視化シリンダを開発し、加えて図 18 に示すスクリュ追従撮影装置による動的可視化手法を提案した⁴²⁾。ここでは、ガイドレールを可視化シリンダと平行に配置し、その上に高速ビデオカメラとストロボを固定したテーブルを乗せてシリンダ軸方向に移動可能とした。このテーブルを射出成形機の油圧ピストンと接続することで、計量可塑化過程におけるスクリュ動作を追従して、スクリュ表面上の固定位置における観察を可能としている。この装置によりポリプロピレンの計量可塑化過程におけるスクリュ圧縮部を観察し、得られたビデオ画像から作成した積層擬似展開画像を図 19 に示す。ここでは、計量進行

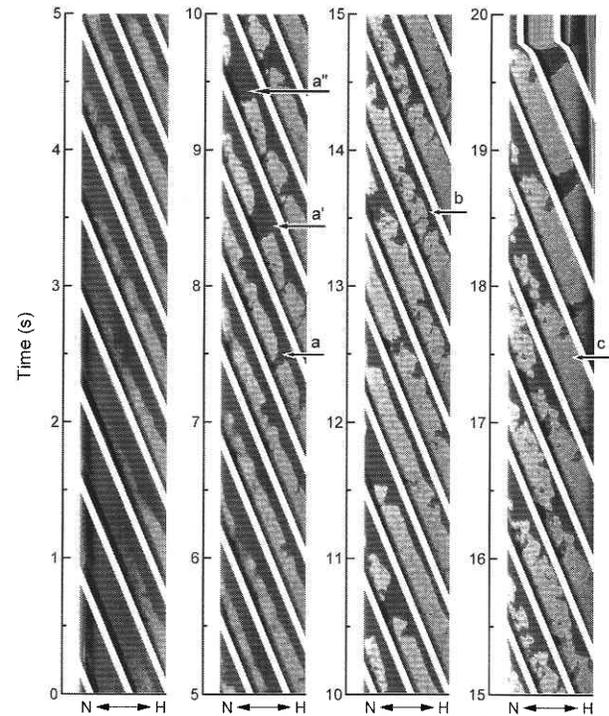


図 19 ポリプロピレン計量可塑化過程におけるスクリュ圧縮部の積層擬似展開画像⁴¹⁾

と共に SB が徐々に増加していくが、b において SB は細かく分裂した形態となり SB 量も減少する。その後 c 以後は溝幅一杯に広がり計量完了に至っている。この現象については、スクリュ供給部から圧縮部へのペレット移動状況を測定し、計量初期に供給部にて溶融相を多く内包する SB が出現し、その SB が後期に圧縮部に達して細かく分裂することを明らかにした。これは、スクリュ供給部での待機中にペレット表層部から加熱を受けた低かさ密度の樹脂ペレット群が、可塑化工程において圧縮・凝集する過程で高効率に溶融し、その前後の SB と比べて溶融の進行が図られたものと推察される。

さらに、著者らは樹脂系を変更して同様の解析を実施し

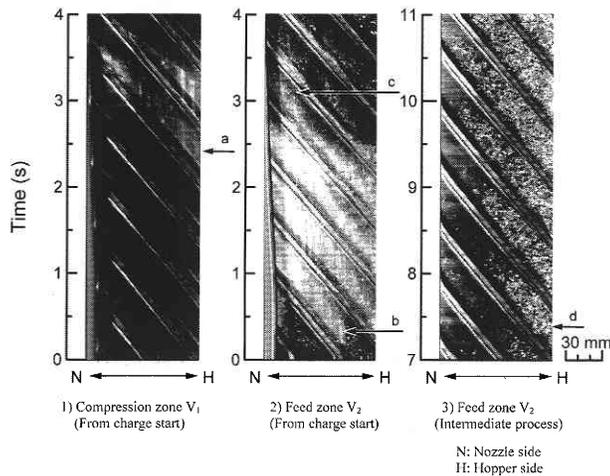


図20 汎用ポリスチレン計量可塑化過程におけるスクリュ供給部の積層擬似展開画像⁴²⁾

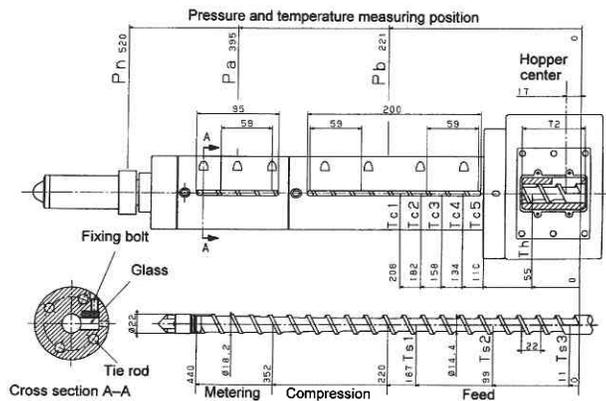


図21 小型可視化シリンダの構造⁴³⁾

た⁴³⁾ 図20に汎用ポリスチレンの計量可塑化過程の擬似展開画像を示す。ここで、画像上の白い反射領域は、計量開始直後に供給部スクリュ溝内にて生成した空隙であり、その後の計量が進行すると共に消失し、スクリュ溝内には白点状の未熔融ペレット群がホッパー側より侵入してくる。このような空隙生成現象は、ポリカーボネートやポリアミドの計量可塑化過程においても確認された。これは、供給部溝内の一部で待機時間中の熔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考えられる。さらに、よりホッパー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される。

以上のように、待機及び射出時間中の伝熱により、スクリュ供給部におけるペレット群の部分的な熔融進行をもたらす現象は、射出成形における間欠的な可塑化過程において、一般に生成するものと考えられる。また、この現象は、

表2 加熱シリンダ内可塑化モデルの課題

加熱シリンダ内領域	研究課題
固体輸送ゾーン	・ 摩擦係数 (温度・圧力・速度依存性) ・ 固体プラグ内ペレット移動現象
熔融遅延ゾーン	・ 界面熔融層の生成過程 ・ メルトプラグ現象
熔融ゾーン	・ 熔融モデルの変遷 ・ ブレークアップ現象 (SBのレオロジー)
熔融体輸送ゾーン	・ 3次元流動 ・ 分散・混合

待機時間、射出時間、供給部に対応するシリンダ温度、及び樹脂ペレットの形状と摩擦係数により大きく左右され、SBのBUPや空隙等の特異な可塑化形態を生成するものと推察される。

これらの課題に対応するため、著者らはホッパー下のペレット噛み込み状況から、その後の固体輸送ゾーン、熔融ゾーンを連続して可視化可能な装置を開発した⁴⁴⁾。図21に小型可視化シリンダの構造を示す。これにより、ホッパー下での各種樹脂ペレットの噛み込み現象の可視化解析を行い⁴⁵⁾、ホッパー口形状⁴⁶⁾、ペレット飢餓供給⁴⁷⁻⁴⁹⁾、粉碎材混入^{50,51)}などによる可塑化過程に対する影響の解析を実施している。

6. おわりに

以上のように加熱シリンダ内可塑化過程は実験・理論の両面から解析され、現在では押出成形に関する単軸スクリュ可塑化過程のシミュレーションプログラムも実用に供されている。しかしながら、現象全容の解析には未だに多くの課題を残している。本解説を終えるにあたり、まとめとして射出成形加熱シリンダ内の可塑化過程の解析上の課題を表2に一括して掲げることとした。

まず、固体輸送部においては、樹脂固体—金属間の摩擦現象が十分に把握できておらず、摩擦係数の温度・圧力・すべり速度などの依存性が明確となっていないことが挙げられる。さらに、固体輸送はプラグ流れが仮定されているが、ペレットの3次元的配置や相互の運動についても考慮することが、ホッパー口形状やペレット飢餓供給の影響を検討する上で必要となる。

また、熔融遅延ゾーンにおいて、固体樹脂と加熱シリンダ・スクリュとの界面にメルトフィルムが生成する現象は、特に射出成形における待機時間中の熔融進行の影響を考慮する上で重要である。これにより、ペレットの輸送力が固体摩擦から粘性せん断力に変化すると共に、熔融樹脂の潤滑作用によりSB輸送が滞るメルトプラグ現象の解析も求められている。

熔融部においては、射出成形における待機時間の影響により、1サイクルの計量工程にて可塑化モデルが変遷する

ことが挙げられる。また、SBのBUP現象についてはSBに加わる力とSB自体のレオロジー的特性を調査していく必要がある。また、熔融モデルの中で、SBと周囲の熔融樹脂との界面での現象もさらに検討し、SB変形に関する3次元的な熔融の解析が必要となろう。

最終段の熔融体輸送部では、すでに検討が開始されているが、3次元流動解析による顔料分散・混練過程を、樹脂温度分布を考慮して解析していく必要がある。

この他、表には記述していないが、特に熔融遅延ゾーン以降に共通した滞留現象（樹脂置換現象）も挙げられる。

以上のように、加熱シリンダ内の可塑化過程には、過渡的現象、非定常現象の課題が山積している。特に、射出成形においては、固体輸送ゾーンから熔融遅延ゾーン、熔融ゾーンにかけて移動するSBの履歴により可塑化モデルが随時変化し、SBのBUP現象も常時観測される。このような計量可塑化過程には、定常的な押出理論の適用は困難と考えられる。そのため、実験解析による現象の正確な把握を積み重ねが今後ますます重要となり、さらにそこでの成果を理論解析の発展へと生かして行くことが強く求められている。

本稿が、加熱シリンダ内における可塑化過程解析技術の現状と課題について理解を深めると共に、可塑化現象の解明のための一助となれば幸いである。

(2002年4月10日受理)

参 考 文 献

- 1) Tadmor, Z., Klein, I.: *Engineering Principles of Plasticating Extrusion*, Reinhold, New York, (1970)
- 2) Vlachopoulos, J., Vlcek, J., Silvi, N., 大谷寛治訳: *プラスチック*, 43 (5), 21 (1992)
- 3) 横井秀俊: *電気加工学会誌*, 34, 6 (2000)
- 4) Maddock, B. H.: *SPE Journal*, May, 383 (1959)
- 5) Street, L. F.: *International Plastics Engineering*, July, 289 (1961)
- 6) 松本勝周, 吉川真介, 赤塚染吉郎: *化学工学*, 22 (4), 208 (1958)
- 7) 森芳郎, 大谷寛治: *プラスチック*, 26 (5), 1 (1975)
- 8) 伊藤孝之: *プラスチック*, 34 (5), 51 (1983)
- 9) 田村幸夫, 上地哲夫, 谷口遇, 水野貴司: *三菱重工技報*, 25 (2), 131 (1988)
- 10) Zhu, F., Chen, L.: *Polymer Engineering and Science*, 31 (15), 1113 (1991)
- 11) 特許第1959356号 (特公平6-92103号)
- 12) 横井秀俊, 早崎進, 高橋博: *高分子学会予稿集*, 37, 2703 (1988)
- 13) 横井秀俊, 岩崎龍一, 平野彰士, 鈴木謙克, 坂井秀敏: *成形加工* '91, 15 (1991)
- 14) 横井秀俊, 岡克典, 根岸智春: *成形加工* '93, 219 (1993)
- 15) Tadmor, Z.: *Polymer Engineering and Science*, July, 185 (1966)
- 16) Tadmor, Z., Duvdevani, H. J., Klein I.: *Polymer Engineering and Science*, July, 198 (1967)
- 17) Dekker, J.: *Kunststoffe*, 66, 130 (1976)
- 18) Lindt, J. T.: *Polymer Engineering and Science*, 16 (4), 284 (1976)
- 19) Lindt, J. T., Elbirli, B.: *Polymer Engineering and Science*, 25 (7), 412 (1985)
- 20) Menges, G., Klenk, P.: *Kunststoffe*, 57, 598 (1967)
- 21) Cox, A. P. D., Williams, J. G., Isherwood, D. P.: 21 (2), 86 (1981)
- 22) Edmondson, I. R., Fenner, R. T.: *Polymer*, 16, 49 (1975)
- 23) Shapiro, J., Halmos, A. L., Pearson, J. R. A.: *Polymer*, 17(10), 905 (1976)
- 24) 深瀬久彦, 野村昭博: *Plastics Age*, Jan., 93 (1978)
- 25) Fukase, H., Kunio, T., Shinya, S., Nomura, A.: *Polymer Engineering and Science*, 22 (9), 578 (1982)
- 26) Donovan, R. C.: *Polymer Engineering and Science*, 11 (3), 247 (1971)
- 27) Lee, K. Y., Han, C. D.: *Polymer Engineering and Science*, 30 (11), 665 (1990)
- 28) Han, C. D., Lee, K. Y., Wheeler, N. C.: *Polymer Engineering and Science*, 30 (24), 1557 (1990)
- 29) 横井秀俊, 鈴木謙克, 長屋元弘, 雲野雅弘: *成形加工* '92, 187 (1992)
- 30) 横井秀俊, 岡田克彦, 白石亘: *成形加工シンポジア* '94, 146 (1994)
- 31) 高橋幸彦, 龍野道宏, 横井秀俊: *成形加工* '99, 19 (1999)
- 32) 宮川守, 龍野道宏, 横井秀俊: *成形加工シンポジア* '00, 185 (2000)
- 33) 高橋幸彦, 龍野道宏, 横井秀俊: *成形加工シンポジア* '99, 115 (1999)
- 34) Fenner, R. T., Cox, A. P. D., Isherwood, D. P.: *Polymer*, 20 (6), 733 (1979)
- 35) Cox, A. P. D., Fenner, R. T.: *Polymer Engineering and Science*, 20 (8), 562 (1980)
- 36) 横井秀俊, 龍野道宏: *成形加工*, 13 (8), 571 (2001)
- 37) 龍野道宏, 横井秀俊: *成形加工*, 投稿中
- 38) Donovan, R. C.: *Polymer Engineering and Science*, 11 (5), 361 (1971)
- 39) Donovan, R. C.: *Polymer Engineering and Science*, 14 (2), 101 (1974)
- 40) Tadmor, Z., Lipshits, S. D., Lavie, R.: *Polymer Engineering and Science*, 14 (2), 112 (1974)
- 41) Lipshits, S. D., Lavie, R., Tadmor, Z.: *Polymer Engineering and Science*, 14 (8), 553 (1974)
- 42) 横井秀俊, 龍野道宏: *成形加工*, 11 (11), 922 (1999)
- 43) 龍野道宏, 高橋幸彦, 横井秀俊: *成形加工*, 13 (2), 125 (2001)
- 44) 横井秀俊, 高次聡, 白石亘: *生産研究*, 52 (9), 410 (2000)
- 45) 横井秀俊, 高次聡: *成形加工*, 12 (7), 457 (2000)
- 46) 横井秀俊, 入部和成, 高次聡: *成形加工シンポジア* '00, 177 (2000)
- 47) 横井秀俊, 高次聡: *成形加工* '97, 243 (1997)
- 48) 高次聡, 横井秀俊: *成形加工シンポジア* '97, 175 (1997)
- 49) 横井秀俊, 川崎達也, 高次聡: *成形加工シンポジア* '98, 83 (1998)
- 50) 宮川守, 龍野道宏, 横井秀俊: *成形加工シンポジア* '00, 185 (2000)
- 51) 寺嶋貴, 宮川守, 龍野道宏, 横井秀俊: *成形加工* '01, 235 (2001)