

狭い円環状空隙に溶融プラスチックを流入させた場合の凝固特性*

稲葉英男*¹, 池上秀章*², 尾崎公一*¹Solidification Characteristics of Molten Polymer Plastics Injected
in a Narrow Annular Cavity

Hideo INABA, Hideaki Ikegami and Koichi Ozaki

This paper deals with solidification and flow characteristics of high-density polyethylene plastics as polymer plastics in a narrow annular cavity cooled on an inner circular tube. The experiments are carried out with various parameters (plastics temperature, flow velocity of the plastics and cooling surface temperature). The obtained results show that the solidification layer formation of polymer plastics is affected by flow behavior and viscosity of molten polymer plastics. The useful dimensionless equations for predicting the amount of polymer plastics and the time of finishing the injection of the polymer plastics into the cavity are derived as a function of Reynolds number, cooling temperature ratio and Stefan number.

Key Words: Solidification, High-Density Polymer Plastics, Non-Newtonian Fluid, Visualization, Injection Molding

1. 緒言

一般に、家電製品、自動車部品に多用されているプラスチック製品の大部分は、生産性の良さや複雑な形状のものが容易に成形できる特徴を有する射出成形法により作られている。射出成形法は、その成形プロセスにおいて、高温・高圧のプラスチックを急冷して成形するために、充填不良、“そり”、“や”“ひけ”などの問題がしばしば起こるようである^{(1),(2)}。近年、これらの諸問題の解決として、コンピュータを利用した数値シミュレーション手法により、流動プラスチックの凝固特性を予想する各種解析の試みがなされている。しかしながら、狭い空間でのプラスチックの流動、凝固現象の詳細な把握は十分になされていない現状にある。平井ら⁽³⁾は、二次元矩形ダクト内の流動プラスチックの凝固過程を、最初に冷却面上に形成されるスキン層と流動停止に伴って成長するコア層の凝固に分類し、特にスキン層の凝固現象が成形品の変形に大きな影響を与えることを数値計算により解明している。一方、黒崎ら⁽⁴⁾は、矩形キャビティ状金型内のプラスチック凝固に伴う残留応力をレーザー照射によるプラスチック固-液相間の複屈折を利用した方法により測定し、金型内のプラスチックに発生する様々な応力関係を解明した。さらに吉井金田⁽⁵⁾は、近赤外光弾性法によるプラスチック成形品の残留応力の測定により、金型内のプラスチックの流動と冷却条件が、その成形品の性質に大きく影響を及ぼすことを明らかにしている。このように従来の研究において、金型内での高圧高温状態における成

形物の残留応力解明に焦点を絞ったものが大部分であり、最も基本的な流動プラスチック樹脂の凝固現象を熱学的そして流体力学的立場より検討したものは少ないようである。

本研究は、2重円管間に形成される狭い円環状空隙に、溶融プラスチックを下部より流動させ、円筒内壁より冷却させた場合の凝固現象を、流動凝固挙動の可視化観察、圧力変化そして凝固位置および凝固量の実測結果より解明するものである。本実験においては、大気圧より少し高い低圧力状態で溶融プラスチックを押込み低速流動を行うことより、時間とともに徐々に冷却面近傍でのスキン凝固層の形成およびコア凝固層の成長の基本的挙動を明らかにするものである。従って本研究で取り上げる低圧成形は一般に行われている高圧高速成形の際に発生する流動プラスチック樹脂の摩擦熱の発生は伴わないものである。本研究は、狭い空隙での流動凝固現象を基礎的に把握しようとするもので、実験パラメータとして溶融プラスチックの押込圧力、温度、流速そして冷却面温度を取り上げてある。最終的には、円環状空隙に流入するプラスチック量と流入完了に至るまでの時間を種々の無次元量にて整理した無次元式を提案するものである。

記号

- c_p : 見掛けの比熱
 D_i, D_o : ガラス円筒内直径および外直径
 d_i, d_o : 冷却円筒内直径および外直径
 d_c : 伝熱直径, 式(3)
 Fo : フーリエ数, 式(7)
 Fo^* : 修正フーリエ数, 式(9)

* 原稿受付 平成5年9月21日。

*¹ 正員, 岡山大学工学部 (〒700 岡山市津島中3-1-1)。*² 学生員, 岡山大学大学院。

- H : 円環状試験部長さ
 K : 擬塑性粘度, 式(2)
 M_p : 流入プラスチック質量
 M_r : 無次元流入ポリエチレン質量, 式(1)
 M_0 : 最大流入プラスチック質量 [= 11 g]
 M^* : 修正無次元流入ポリエチレン質量, 式(6)
 n : べき指数, 式(2)
 P_a : 押し込み空気圧力
 P_{in} : 試験部入口圧力
 Q_c : 冷媒流量
 Re : レイノルズ数, 式(1)
 r : 内管表面から外向きの半径方向距離
 Ste : ステファン数, 式(1)
 T : 温度
 T_{pin} : 試験部入口における溶融プラスチック温度
 T_{wm} : 平均冷却伝熱面温度
 t : 時間
 t_f : 充填完了時間
 u : 溶融ポリエチレンの先端移動速度
 v : 比容積
 x : 円環状試験部入口よりの距離

ギリシャ文字

- γ : せん断速度, δ : 流路間隙 [= $(D_i - d_o)/2$]
 η : 粘性係数, θ_c : 冷却温度比, 式(1)
 ρ : 密度

添字

- f : 融点, in : 入口

- m : 平均, p : プラスチック
 w : 冷却面

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を図1に示す。実験装置は主としてプラスチック樹脂溶融部、プラスチック樹脂の流動凝固を伴う円環状空隙を有する試験部そして円筒状冷却伝熱面の冷却系統に大別できる。プラスチック樹脂溶融部は、パイプ状電気ヒータ(容量1 kW)内蔵の鋼製円筒容器⑥(高さ155 mm, 直径50 mm, 厚さ3 mm)、溶融プラスチック樹脂を空気圧により試験部へ流入させるための空気圧縮機⑦(出力2.2 kW, 最大圧力500 kPa)系統および溶融プラスチック樹脂供給配管④系統より成り立っている。鋼製円筒容器は、プラスチック樹脂材料として高密度ポリエチレン樹脂(以下ポリエチレンと呼ぶ)を内蔵のパイプ状ヒータにより溶融し、任意の樹脂温度 T_{pt} に維持するものである。樹脂供給配管は、鋼製円筒容器からの溶融樹脂を試験部へ輸送させる目的に使用されるもので、配管の一部には試験部への樹脂供給圧力測定センサーおよび温度測定センサーが取り付けられている。試験部近くに設けた2ヶ所の圧力センサーは、耐熱性ダイヤフラムタイプのもので、その出力は圧力変換器を介してコンピューターに自動記録される。本測定系における流動樹脂圧力の測定精度は、 $\pm 3\%$ 以内と推定される。また、鋼製円筒容器および樹脂供給配管に設けられる温度センサーとしては、外径 $\phi = 1$ mmのシース型熱電対が用いられた。本温度測定系の測定精度は、 $\pm 1.5\%$ 以内である。鋼

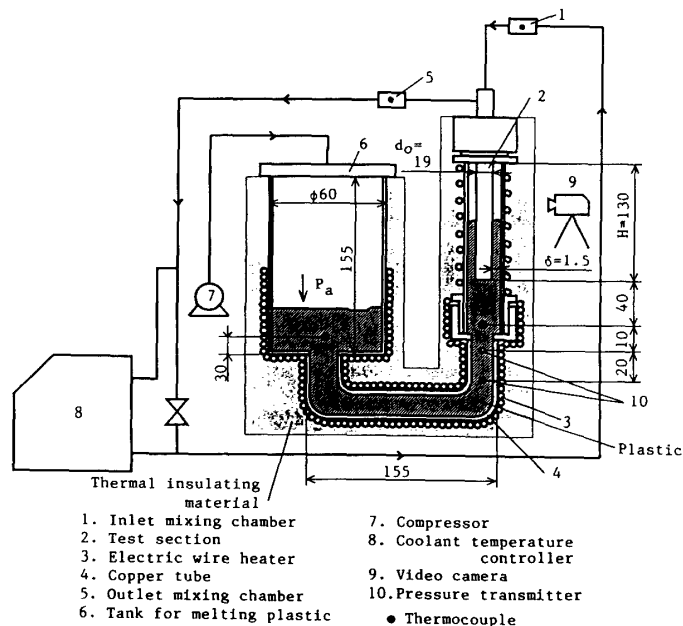


図1 実験装置の概略

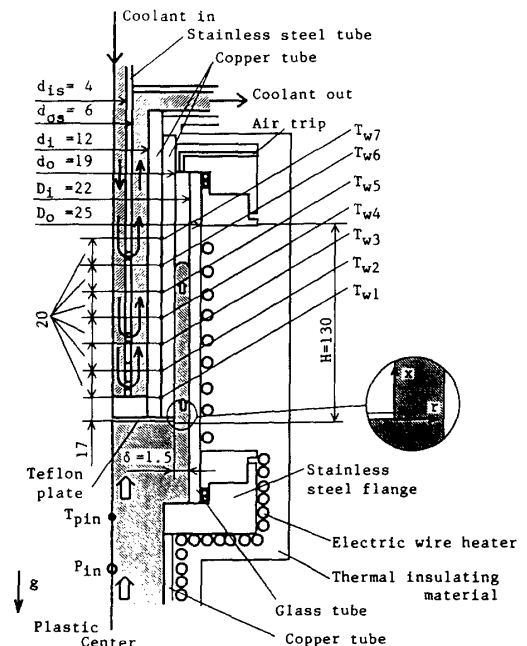


図2 試験部の詳細

製円筒容器および樹脂供給配管系内の熔融樹脂より外部への熱散逸を避け、熔融樹脂を一定の温度・圧力条件下で試験部へ供給する目的より、円筒容器および供給配管系は厚さ 50 mm のグラスウール断熱材にて保温されている。周囲環境への熱散逸量は、円筒容器に設けられたパイプ状電気ヒータ入力 の 5.5% 以内と比較的熱損失の少ない系となった。

試験部の詳細を示したものが図 2 である。熔融プラスチックは、前述の樹脂供給配管系を経て円筒状試験部の下方から、耐熱性ガラス円筒 (内直径 $D_i = 22$ mm, 外直径 $D_o = 25$ mm) 内側と外直径 $d_o = 19$ mm の冷却円筒外側の間で形成される間隙 $\delta = 1.5$ mm, 長さ $H = 130$ mm の円環状空隙内に流入凝固することになる。本研究での試験円環空隙は使用プラスチックの粘性や低圧成形などを考慮して、 $\delta = 1.5$ mm としてある。円筒状冷却部は、2 重管構造となっており、冷却面を形成する外管は内直径 $d_i = 12$ mm, 外直径 $d_o = 19$ mm と比較的肉厚の大きい銅管を使用している。冷媒であるエチレングリコール 50% 水溶液は、ステンレス製円管 (内直径 $d_{is} = 4$ mm, 外直径 $d_{os} = 6$ mm) 上部より流入し、円管に設けた多数の小穴よりステンレス管と銅管で形成される空隙 3 mm の円環状流路に流出し、銅管を冷却しながら上部より冷却装置へ戻ることになる。円筒冷却面の各表面温度 T_{w1}, \dots, T_{w7} は、冷却円筒軸心より 6 mm の位置で、冷却円筒底面より軸方向に 9 mm, 29 mm, \dots , 129 mm の 20 mm 間隔で 7 個所に設けた T 型熱電対 (素線直径 $\phi = 0.12$ mm) により測定してある。冷媒のステンレス円管小穴からの分配や比較的肉厚の厚い銅管を冷却伝熱管としたことより、冷却面の軸方向の温度むら (7 測定点に対して) は小さく、設定冷却面温度 T_w に対して最大 $\pm 5\%$ 以内に収まり、等温冷却条件に近いものとなった。さらに、試験円環部に流入した熔融プラスチックが外側の耐熱ガラス近傍での凝固を避ける目的から、耐熱ガラス円管外表面には、ピッチ 15 mm 間隔で素線直径 $\phi = 2$ mm のニクロム電気ヒータ (30 W/m) を巻き付けてある。ニクロム電気ヒータの印加電圧を調節することにより、耐熱ガラス管内面温度をプラスチック樹脂である高密度ポリエチレンの融解開始温度 $T_m = 120$ °C に調節し、高密度ポリエチレンの外側よりの凝固を防止してある。また、外部環境の影響を極力軽減する目的より、耐熱ガラス管外周は厚さ 50 mm のアルミ箔付グラスウール保温材を取り付けてある。なお、冷却面温度 T_w の制御は、冷媒 (エチレングリコール 50% 水溶液) の流量と温度を温度調節器^⑧により調節することにより行っている。

図 3 は、使用した供試プラスチック樹脂として的高密度ポリエチレンの固相および液相にわたる比容積 v (m^3/kg)

と温度 T (°C) の関係⁽⁶⁾を示したもので、ポリエチレンは温度 $T = 120 \sim 140$ °C の領域に相変化の起こる潜熱分散型の物質である。ポリエチレンの潜熱を含む見掛けの比熱 c_p ($\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$) と温度 T (°C) の関係⁽⁷⁾を示したものが図 4 である。温度 $T = 120$ °C 付近より見掛けの比熱 c_p がその潜熱分により大きく上昇し、ほぼ $T_f = 132.8$ °C で最大の c_p となり、 $T = 140$ °C 位で潜熱分が無くなることが理解できる。熔融ポリエチレンは、非ニュートン流体であることが知られており、供試高密度ポリエチレンの粘性係数 η ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) とせん断速度 γ (s^{-1}) の関係を示したものが図 5 である。せん断速度 γ の増大そして温度 T の増加と共に、粘性係数 η が減少することがわかる。

熔融ポリエチレンの凝固実験は、熔融ポリエチレンの収納されている前述の鋼製円筒容器へ圧縮機から任意の空気圧 P_a を印加し、熔融ポリエチレンを供給円管を

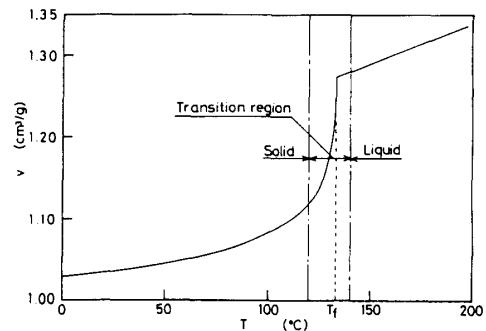


図 3 比容積の温度変化特性

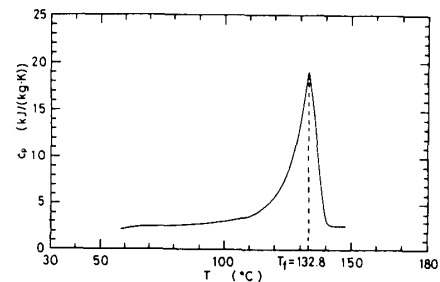


図 4 見掛けの比熱の温度依存性

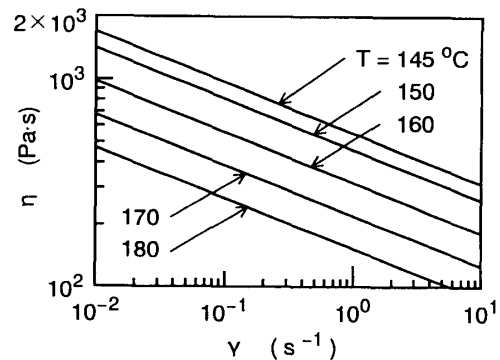


図 5 粘性係数とせん断速度の関係

介して、試験円環部へ流入させ、冷却円筒に接した溶融プラスチックから凝固が始まる。この凝固挙動は、耐熱ガラス円管に取り付けたグラスウール保温材を外し、高画素を有するビデオカメラにより撮影し、凝固割合そして流入ポリエチレン量の経時変化が測定される。また、ポリエチレン流量は、前述の樹脂供給配管に設けた2ヶ所の圧力測定結果の差圧により算定した。差圧と流量の関係は予備実験での流量検定により求めてある。流動溶融ポリエチレンの試験部内での凝固に対する停止(ショート・ショット)そして完全に試験空間に充填凝固までの挙動は、ビデオ映像システムからのデータ解析により決められた。

実験パラメータは次の範囲で変化させて実験データが採取された。ポリエチレンの流入温度 $T_{pin} = 145 \sim 180$ °C、冷却円筒伝熱面平均温度 $T_{wm} = 70 \sim 100$ °C、溶融プラスチックの押込み圧力 $P_a = 23.5 \sim 196$ kPa、冷媒流量 $Q_c = 0.48 \sim 0.55$ kg/min。

3. 実験結果および考察

3.1 潜熱ポリエチレンの流動および凝固挙動

試験垂直円環状空隙に、下部より溶融ポリエチレンを流入させた場合の流動挙動をビデオ撮影した結果を時間経過毎にスケッチしたものが図6である。図中の斜線

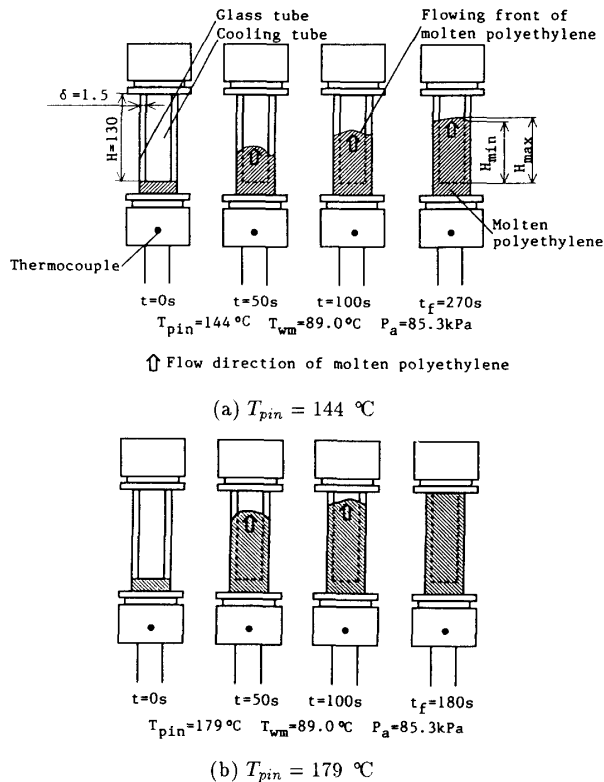


図6 ポリエチレンの流動凝固挙動

部が溶融ポリエチレンの存在する領域である。図6(a)は、溶融ポリエチレン入口温度 $T_{pin} = 144$ °C、平均伝熱面温度 $T_{wm} = 89.0$ °C、押込み空気圧 $P_a = 85.3$ kPa の場合における流動ポリエチレンの流入状況の経時変化を示したものである。流入開始後の時間 t の経過と共に流動ポリエチレン先端位置は上昇するが、先端形状は凝固による体積収縮などの影響により起伏に富んだものとなる。この実験条件では、 $t_f = 270$ 秒でポリエチレンの流動が停止し、最終的に凝固が完了する。さらに溶融ポリエチレン流入温度を $T_{pin} = 179$ °C に上昇させた場合の可視観察結果を示したものが図6(b)である。このようにポリエチレンの温度を上昇すると、粘性の低下そして冷却円筒表面での凝固量も減少し、図6(a)で示したよりも流動ポリエチレン流路面積の減少も少なく、より短時間で多くの溶融ポリエチレンが試験円環状空隙に流入し、最終的に $t_f = 180$ 秒で全ての円環状空隙がポリエチレンで満たされることになる。

図7は、試験円環状空隙内での溶融ポリエチレンの凝固および流動の様子を、時間経過毎(30秒間隔)にスケッチしたものである。流入した溶融ポリエチレンは、まず冷却面近傍で凝固し、いわゆるスキン層⁽⁴⁾を形成する。そのスキン層の厚さは流れ方向に向かって増大する傾向にある。これは、高温の溶融ポリエチレンが上部に向かうに従って放熱のために温度低下し、スキン層を介して冷却円筒面に流出する熱量が上部(下流)ほど減少する。その結果下流ほど凝固界面の増大、すなわちスキン層厚さの増大となる。一方、このスキン層の増大により、溶融ポリエチレンの流路の減少、さらに流動抵抗の増大となり、流入速度の減少をもたらすことになる。また、スキン層の形成と共に下流側の流路の狭い領域を越えた溶融

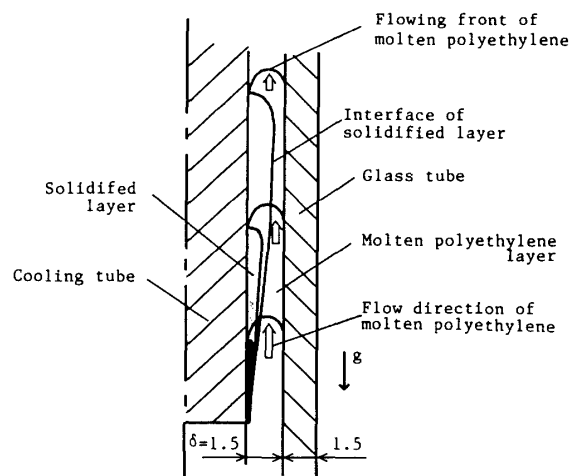


図7 円環状空隙部での流動凝固挙動

ポリエチレンがスキン層先端に進出し、冷却面に接して再び凝固し、連続的にスキン層の成長となることが理解できる。

図8(a),(b)は、それぞれ図6(a),(b)の実験条件のもとでの溶融ポリエチレン流入圧力 P_{in} 、流動ポリエチレン先端の移動速度 u として冷却円筒表面温度 T_{w1}, \dots, T_{w7} (数字の大きなもの程下流に位置する) の経時変化を示したものである。なお、ポリエチレン先端の移動速度 u は、円環状空隙に流入するポリエチレン先端の移動状況をビデオ撮影し、その結果の画像処理により算出したものである。時間軸である横軸は、流動挙動のビデオ撮影結果より、試験円環状空隙にポリエチレンが流入し始めた時点の時間を $t = 0$ 秒としてある。従って、試験部へ流入する前は、負の時間で表してある。図8(a)の実験条件では、流入直後に最大の先端移動速度 u_{in} となり、その後急激に u の低下が認められ、約 $t = 50$ 秒以降にて低流速 u の状態で速度変動を伴いながら減速し、最終的に $t_f = 270$ 秒で流動が停止することになる。この速度の変動は、図7の凝固過程で示したように、スキン層の発達により、狭い流路を溶融ポリエチレンが流動抵抗の変化を伴いながら流動することによるものと思われる。流入圧力 P_{in} の上昇割合は、ポリエチレン先端速度の急激な減少の間では比較的大きく、その後は小さくなる傾向となる。最終的に押込み圧力 $P_a = 85.3$ kPa の一定値となり、ポリエ

チレンの流動が停止する。一方、冷却円筒表面温度は、まず試験部入口近くの位置での温度 T_{w1} の上昇がみられ、その後高温の溶融ポリエチレンの進行と共に下流側に位置する部分の温度上昇となることが理解できる。流入ポリエチレン温度を $T_{pin} = 179$ °C に上昇した場合の結果である図8(b)では、その低粘性のために、急激に速度 u の低下が認められ、 $t_f = 180$ 秒で円環状空隙の上部先端に達し、ポリエチレンの流動が停止することになる。また、下流側冷却面の温度上昇も比較的短時間から高温に推移することも図8(b)の温度分布の経時変化より理解できる。最終的に、円環状空隙に流入凝固したポリエチレンの質量 M_p は、凝固実験終了後ポリエチレンを取り出し、精密自動天秤(測定精度 ± 1 mg)にて測定することにより求めた。本円環状空隙に最大流入できるポリエチレンの質量は $M_0 = 11$ g である。

図9は、押込み圧力 $P_a = 85.3$ kPa 一定の条件で、溶融ポリエチレン入口温度 T_{pin} と試験円環状空隙へ最終的に流入したポリエチレン質量 M_p の関係を冷却円筒表面平均温度 T_{wm} をパラメータに示したものである。入口温度 T_{pin} の増大と共にポリエチレンの粘性は図5で示したように低下し、ポリエチレンの流動が容易となり、流入ポリエチレン質量 M_p の増大となる。この傾向は、冷却面温度 T_{wm} の増大と共に著しくなり、 $T_{wm} = 100$ °C の場合は、 $T_{pin} = 144$ °C の低温でも流入ポリエチレン質量は $M_0 = 11$ g となり、試験円環状空隙は全てポリエチレンで充填されることになる。一方、 $T_{wm} = 70$ °C の低温の場合は、 $T_{pin} = 180$ °C に増大させても、完全に円環状空隙がポリエチレンで満たされない状態で凝固が完了することになる。

図10は、冷却円筒表面平均温度 $T_{wm} = 80$ °C 一定の条件における、入口温度 T_{pin} と流入ポリエチレン質量 M_p の関係を、押込み圧力 P_a をパラメータとして示したもの

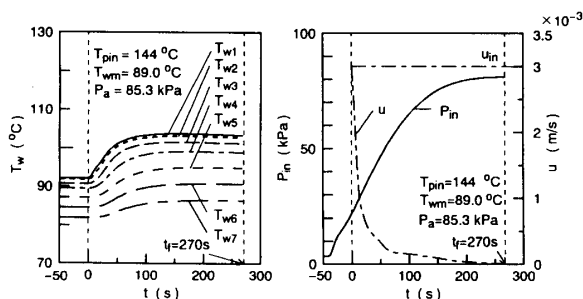
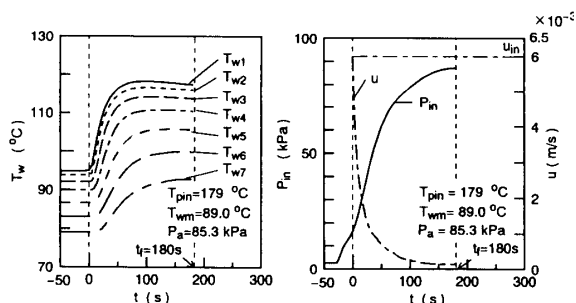
(a) $T_{pin} = 144$ °C(b) $T_{pin} = 179$ °C

図8 溶融ポリエチレン流入圧力 P_{in} 、先端移動速度 u と冷却円筒表面温度の経時変化

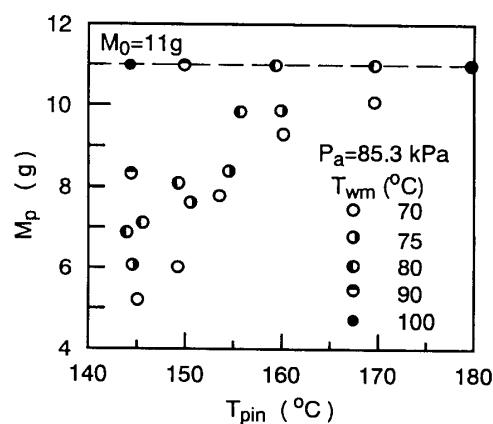


図9 流入質量 M_p に及ぼすポリエチレン入口温度 T_{pin} の影響(押込み圧力 $P_a = 85.3$ kPa)

である。\$P_a = 20.4\$ kPa の場合には、ほぼ \$T_{pin} = 154\$ °C 以下の温度ではポリエチレンはほとんど試験部に流入しない状態となり、それ以上の温度においては、入口温度 \$T_{pin}\$ の上昇と共に徐々に試験部に流入凝固するポリエチレンの割合は増大することになる。さらに \$P_a\$ の増大と共に、流入ポリエチレン質量 \$M_p\$ の増大となる。\$P_a = 196\$ kPa の条件では、ほぼ \$T_{pin} = 150\$ °C の温度にて、試験円環状空隙は完全にポリエチレンで充填されることになる。

押込み圧力 \$P_a\$ と試験円環状空間入口に流入した溶融ポリエチレンの平均流入速度 \$u_{in}\$ (m/s) の関係を流入ポリエチレン温度をパラメータとして示したものが図 11 である。\$P_a\$ の増大と共にポリエチレン平均流入速度の増大がみられ、その増加割合も流入温度の上昇につれ大きくなる傾向にある。さらに、押込み圧力 \$P_a\$ の大きなものほど、流入温度 \$T_{pin}\$ による平均流入速度 \$u_{in}\$ の依存性が大きくなる。なお、円環状試験部への溶融ポリエチレンの流入速度 \$u_{in}\$ は、ポリエチレンの流動状態を撮影したビデオ画像の解析より得られた。また、得られた平均流入速度 \$u_{in}\$ は、樹脂供給配管に設けた差圧による流量

測定から算出した平均流入速度と \$\pm 5\%\$ 以内で一致する結果を得ている。

3.2 流入ポリエチレンの質量の無次元整理

前述の流入ポリエチレン質量の実験結果より、流入ポリエチレン質量 \$M_p\$ は、溶融ポリエチレン入口温度 \$T_{pin}\$、冷却伝熱面温度 \$T_{wm}\$、溶融ポリエチレン平均流入速度 \$u_{in}\$、凝固に伴う潜熱量 \$L\$、ポリエチレンの保有する顕熱量等に直接依存することがわかる。円環状試験部に流入凝固するポリエチレン質量 \$M_p\$ に関係するこれら諸因子の効果を、次元解析により無次元量の形で表すと次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \text{ポリエチレン流入質量比} \quad M_r &= \frac{M_p}{M_0} \quad (M_0 = 11\text{g}) \\ \text{冷却温度比} \quad \theta_c &= \frac{T_f - T_{wm}}{T_{pin} - T_f} \\ \text{ステファン数} \quad Ste &= \int_{T_f}^{T_{pin}} c_p^* dT / L \\ \text{レイノルズ数} \quad Re &= \rho u_{in}^{2-n} d_e^n / K \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで、\$c_p^*\$ は、見掛けの比熱 \$c_p\$ より潜熱分を差し引いた比熱、\$K\$ は次式(2)で定義される擬塑性粘度である。溶融ポリエチレンは、図5で示されたように非ニュートン流体の範疇に属するもので、その動粘性係数の取り扱いが問題となる。一般に非ニュートン流体の粘性係数 \$\eta\$ は次のように温度 \$T\$ とせん断速度 \$\gamma\$ の関数で表される⁽⁹⁾。

$$\left. \begin{aligned} \eta &= K \cdot \gamma^{n-1} \\ K &= A \cdot \exp(B \cdot T) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

定数 \$n, A, B\$ は、図 5 の \$\eta\$ と \$\gamma\$ の関係より、\$n = 0.757, A = 1.13 \times 10^5, B = -3.67 \times 10^{-3}\$ となる。伝熱直径 \$d_e\$ は、円環状空間の断面積と伝熱長さより次のようになる。

$$d_e = 4\pi[(D_i/2)^2 - (d_o/2)^2]/(\pi d_o) = (D_i^2 - d_o^2)/d_o \dots (3)$$

従って、前述の試験円環状空隙の入口におけるレイノルズ数 \$Re\$ は、流入ポリエチレン温度における擬塑性粘度 \$K\$、式(3)で定義した \$d_e\$ と溶融ポリエチレン平均入口流速 \$u_{in}\$ から算出された。本実験においては、試験部で凝固現象を伴うこととポリエチレン押込み圧力一定の条件のため、入口流速が時々刻々変化することより、ポリエチレン流入直後の試験部入口での平均入口流速 \$u_{in}\$ をレイノルズ数に採用してある。以下各無次元量の無次元流入ポリエチレン質量 \$M_r\$ に及ぼす効果を検討する。

図 12 は、冷却温度比 \$\theta_c = 2.0\$ の条件でレイノルズ数 \$Re\$ と無次元流入ポリエチレン質量 \$M_r\$ の関係をステファン数をパラメータとして示したものである。本実験は、高粘性流体である高密度ポリエチレンを採用したことと、試験円環状空隙での流入速度も数 mm/s と非常に低速であることより、\$Re\$ 数の値も小さなものとなる。当然のことながら、\$Re\$ 数の増大は入口流入速度 \$u_{in}\$ の増大を意味

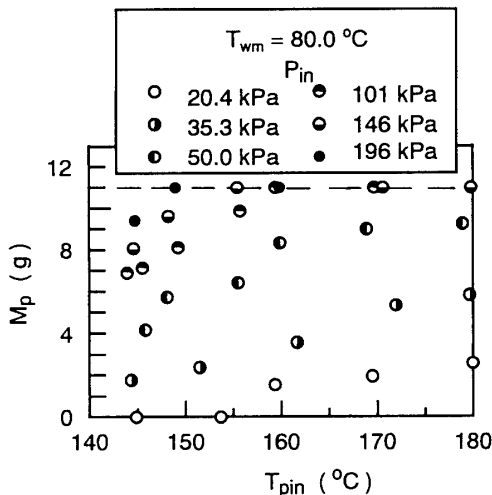


図 10 流入質量 \$M_p\$ に及ぼすポリエチレン入口温度 \$T_{pin}\$ の影響 (\$T_{wm} = 80\$ °C)

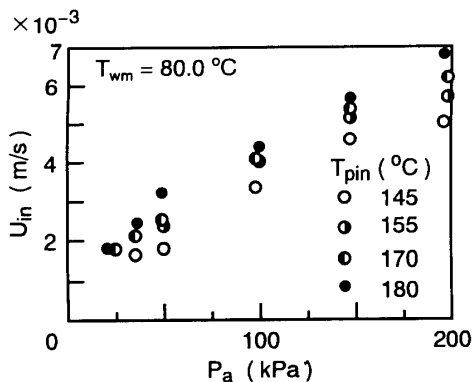


図 11 押込み圧力 \$P_a\$ と平均流入速度 \$u_{in}\$ の関係

し、ポリエチレン流入量も増大することになる。また、同じ Re 数において、 Ste 数の大きなもの程 M_r の値は増加する傾向にある。

図 13は、 $\theta_c = 2.0$ における M_r と Ste 数の実測値を Re 数をパラメータとしてプロットしたものである。各 Re 数において、 Ste 数の増加と共に徐々に M_r の増加傾向が認められる。これは、 Ste 数の増大により主に溶融ポリエチレン流入温度 T_{pin} の増大に伴うポリエチレンの粘性係数の低下に起因した流動抵抗の減少のために、試験部へのポリエチレン流入量の増大となることより説明できる。

図 14は、 $Ste = 1.08$ における M_r と冷却温度比 θ_c の実測値を Re 数をパラメータとしてプロットしたものである。図 14において、冷却温度比 θ_c の増大と共に M_r の値は減少する傾向にある。この傾向は、次のように概略説明することができる。まず、 θ_c の分母である流入ポリエチレン入口温度 T_{pin} 一定の場合、 θ_c の増大は、冷却伝熱面温度

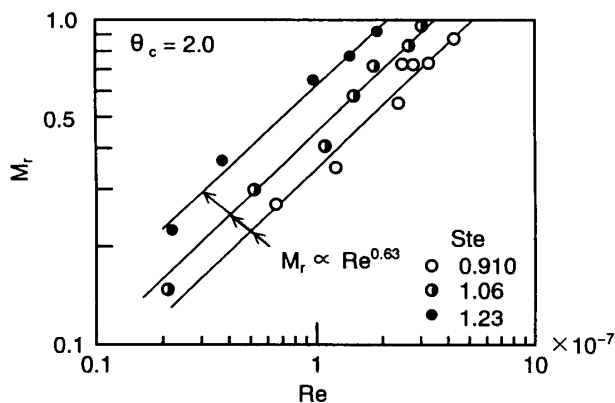


図 12 入口レイノルズ数と無次元流入ポリエチレン質量の関係

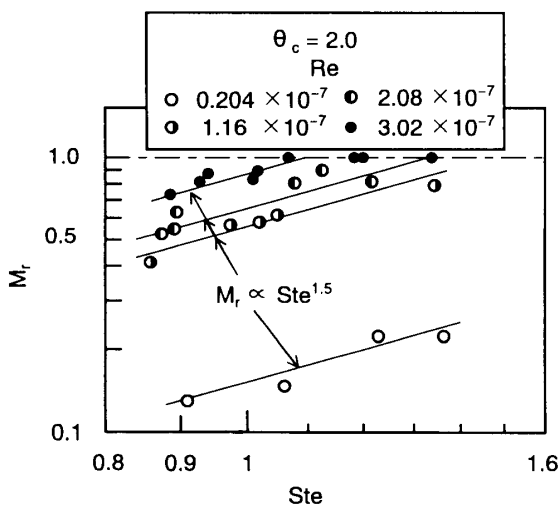


図 13 無次元流入ポリエチレン質量とステファン数の関係

T_{wm} の低下を意味し、凝固量の増大となる。この結果、ポリエチレンの流路断面積の減少が流動抵抗の増大を生み、流入ポリエチレン質量の減少すなわち M_r の減少となる。一方、 θ_c の分子である冷却伝熱面温度 T_{wm} 一定の場合、 θ_c の増大は、 T_{pin} の減少となり、その結果ポリエチレン粘性係数の増大を生み、流動抵抗の増大となる。さらに、 T_{pin} の減少は、凝固量の発達を促進し、流路断面積の減少となり、流動抵抗の増大となる。これら流動抵抗の増大の相乗効果より、 T_{pin} の減少による θ_c の増大は、流入ポリエチレン質量 M_p の減少すなわち M_r の減少となる。

以上の結果より、 M_r は次の関係式で整理することが出来る。なお、一部の試験条件においては、溶融ポリエチレンが試験部に完全に充填される場合も観察されたが、以下においては、同ポリエチレンが試験部に完全に充填されることなく流動の停止する、無次元充填量 $M_r < 1$ の実験データを対象に、実験整理式の提案を試みる。

$$M_r = C Ste^a \theta_c^m Re^n \dots \dots \dots (4)$$

式 (4) の係数 C そして各指数は、最小 2 乗法にて、標準偏差 $\sigma = \pm 13\%$ 以内で次式で表される。

$$M_r = 0.44 Ste^{1.5} \theta_c^{-0.46} Re^{0.63} \dots \dots \dots (5)$$

$$M^* = M_r / (Ste^{1.5} \theta_c^{-0.46}) = 0.44 Re^{0.63} \dots \dots \dots (6)$$

適用範囲 : $Ste = 0.87 \sim 1.4$, $\theta_c = 1.05 \sim 4.3$, $Re = 0.28 \times 10^{-5} \sim 8.0 \times 10^{-5}$.

図 15は、 M^* と Re 数の関係にて $M_r < 1$ に関する実測値を再プロットしたものである。図 15中の実線は式 (6) を表し、実線と実測値は前述のように標準偏差 $\sigma = \pm 13\%$ 以内で比較的良く一致していることがわかる。また、円環

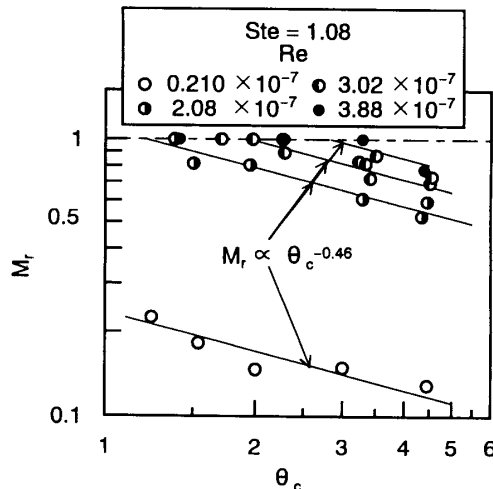


図 14 無次元流入ポリエチレン質量と冷却温度比の関係

状空隙に溶融ポリエチレンが流入し、最終的に充填完了する時間も重要な因子となる。円環状空隙入口部にポリエチレンが流入開始し、最終的に流入完了するまでの時間を t_f とすると、無次元時間であるフーリエ数 Fo を次のように定義する。 Fo 数は、流入ポリエチレン量と関連するもので、前述と同じ因子を採用すると式 (7) の関係で表される。

$$Fo = at_f/d_c^2 = C Ste^l \theta_c^m Re^n \dots \dots \dots (7)$$

得られた実測値を式 (7) の関係にて最小 2 乗法にて整理すると、係数 C 、各指数は次のようになる。

$$Fo = 24 Ste^{2.3} \theta_c^{-0.59} Re^{0.36} \dots \dots \dots (8)$$

$$Fo^* = Fo / (Ste^{2.3} \theta_c^{-0.59}) = 24 Re^{0.36} \dots \dots \dots (9)$$

適用範囲 : $Ste = 0.87 \sim 1.4$, $\theta_c = 1.05 \sim 4.3$, $Re = 0.28 \times 10^{-5} \sim 8.0 \times 10^{-5}$.

図 16 は、 Fo^* と Re 数の関係にて $M_r < 1$ に関する実測値をプロットしたもので、実線は式 (9) を表す。本実験整理式 (9) は、実測値を標準偏差 $\pm 14\%$ 以内で比較的良く実測値を表すことがわかる。以上のように、式 (5) および式 (8)

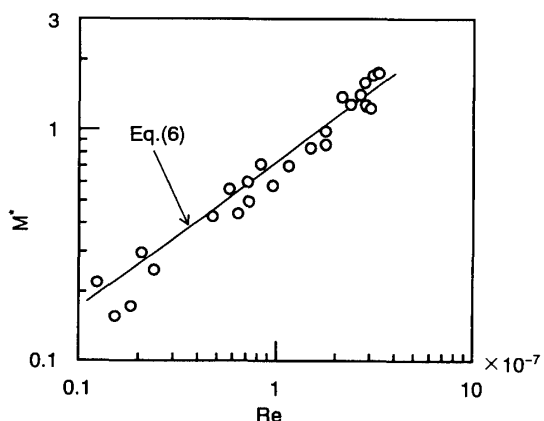


図 15 M^* と Re の関係

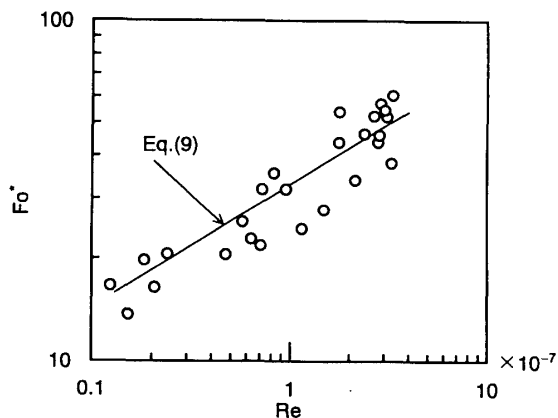


図 16 Fo^* 数と Re 数の関係

を用いることにより、狭い円環状空隙に溶融ポリエチレンを低圧で流入凝固させた場合の、最大ポリエチレン流入質量および流入完了時間を求めることが出来る。

4. 結論

狭い円環状空隙に、プラスチック樹脂としての溶融高密度ポリエチレン樹脂を低圧状態で流入させ、空隙内での流動凝固現象に影響を及ぼすポリエチレン流入温度、流入速度、冷却伝熱面温度の効果を実験的に検討し、次のような結論を得た。

- (1) 円環状空隙に流入した溶融ポリエチレンは、内側の冷却面近傍でまず薄い凝固層(スキン層)を形成し、その凝固層は流れ方向に厚さを増しながら成長する。スキン層厚さの増大と共に生じる流路断面積の減少は、流動抵抗の増大を生み、溶融ポリエチレンの流動停止となる。最終的に停止ポリエチレンの完全凝固(コア凝固層)となることが可視化観察より定性的に明らかとなった。
- (2) 溶融ポリエチレンの円環状空隙への最終流入質量と流入完了時間に関するポリエチレン流入温度、流入速度、冷却面温度の関係が定量的に明らかとなった。
- (3) さらに、ポリエチレン流入質量と流入完了時間に関する諸因子の無次元量を定義し、そして無次元流入質量と流入完了時間であるフーリエ数を、冷却温度比、ステファン数およびレイノルズ数の関数で表現し、有用な無次元整理式の誘導を行うことが出来た。

本研究は、狭い円環状空隙で溶融プラスチックの流動凝固現象をプラスチック温度、流速そして冷却温度条件を変化させて、その基本的特性を明らかにしたもので、今後、空隙の寸法、プラスチックの種類等の影響も検討する必要があるものと思える。

本研究を遂行するにあたって、(株)日本製鋼所広島製作所成形機器システム開発部の皆様より射出成形機に関する基礎的な情報等の支援を戴きました。ここに記して感謝する次第である。

参考文献

- (1) White, J. L. and Dee, H. B., *Polym. Eng. Sci.*, 14-3 (1974), 212.
- (2) Ballman, R. L., Shusman, T. and Toor, H. L., *Mod. Plast.*, 37-1 (1959), 105.
- (3) 平井, 他 3 名, *材料*, 38-427 (1989), 334.
- (4) 黒崎, 佐藤, 石井, *機論*, 56-522 (1990), 504.
- (5) 吉井, 金田, *成形加工*, 1-4 (1989), 399.
- (6) Banschel, H., *Kunststoffe*, 51 (1961), 183.
- (7) 林田建世, 押出成形における冷却技術, (1980), 13, 日本プラスチック加工技術協会.
- (8) 伊藤公正, *プラスチックデータハンドブック*, (1980), 39, 工業調査会.
- (9) 富田, *レオロジー*, (1975), 100, コロナ社.