

矩形流路内における溶融高密度ポリエチレンの流動・凝固現象*

稲葉 英男^{*1}, 尾崎 公一^{*1}, 池上 秀章^{*2}

Solidification and Flow Characteristics of Molten High-Density Polyethylene Injected into a Rectangular Cavity

Hideo INABA, Koichi OZAKI and Hideaki IKEGAMI

Solidification and flow characteristics of molten high-density polyethylene flowing in a rectangular cavity having a cooling wall are investigated experimentally. Experiments are carried out under various parameters of molten polyethylene temperature, flow velocity of the polyethylene, cooling wall temperature and the thickness of the cavity. The obtained results reveal that the solidification layer formation of the polyethylene is affected by flow behavior, polyethylene temperature and cooling wall temperature. The useful non-dimensional equations, which predict the amount of polyethylene and the time required for injecting the polyethylene into the cavity, are derived as a function of Reynolds number, cooling temperature ratio and Stefan number.

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

1. 緒言

近年、家電、自動車部品、レンズ等、プラスチック製品はあらゆる分野に活用されており、さらにその需要は増加しつつある。これらプラスチック製品の製造法の一つである射出成形法は、生産性の良さや複雑な形状のものが比較的容易に成形できることより、広く利用されているが、高温・高圧の溶融プラスチックを急冷して成形するため、充填不良、“そり”、または“ひけ”などの問題がしばしば起こるようである^{(1),(2)}。このような問題を解決すべく、射出成型法に関する研究は従来より多数行われている。平井ら⁽³⁾は、厚さ1 mmの二次元矩形ダクト内の溶融プラスチックの流動・凝固過程に関する数値解析を行い、最初に冷却面上に形成されるスキン層が成形品の変形に大きな影響を与えることを解明している。一方、黒崎ら⁽⁴⁾は、厚さ4 mm×幅12 mm×長さ65 mmの矩形キャビティにおけるプラスチックの流動・凝固実験を行い、レーザー光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残留応力を測定し、金型内のプラスチックに生じる様々な応力関係を解明した。さらに、著者ら⁽⁵⁾は、外直径19 mmの冷却円筒と外円筒に形成される厚さ1.5 mmの狭い円環状空隙における溶融プラスチックの流動・凝固に関する実験を比較的低い押し込み圧力状態にて行い、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可視観察により明らかにした。さらに、

空隙内に流入するプラスチック量に及ぼす、溶融プラスチック温度、冷却円筒表面温度、流入プラスチック速度の影響を定量的に明らかにした。このように、従来の研究は、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伝熱学的そして流体力学的立場より検討したものは、著者らの研究以外には見あたらない。また、前述のいずれの研究も、比較的狭い流路を対象としたもので、流路厚さの影響を系統的に扱った研究は見あたらない現状にある。

本研究は、矩形流路に溶融プラスチックを下方より流動させ、一側面より冷却・凝固させた場合を対象に、溶融プラスチックである高密度ポリエチレンの流動・凝固挙動の可視化観察、圧力変化、凝固位置および凝固量の実測を行い、矩形流路内での溶融ポリエチレンの流動・凝固現象の基本的特性を解明するものである。さらに、矩形流路の厚さを5～10 mmの範囲で種々変化させ、従来よりほとんど研究の行われていない、比較的厚い流路に関する実験データを得ると共に、流路厚さの影響についても検討を行うものである。また、本実験においても前報⁽⁵⁾と同様、大気圧より少し高い低圧力にて溶融ポリエチレンを押し込み低速流動を行うことにより、矩形流路内での溶融ポリエチレンの流動・凝固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ポリエチレン樹脂の摩擦熱の発生は伴わないものとなっている。本研究では、実験パラメータとして溶融ポリエチレンの押し込み圧力、温度、流速、冷却面温度、さらに流路厚さを

* 原稿受付 平成5年5月12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。

取り上げて、最終的には、矩形空隙に流入するポリエチレン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^*	: 比熱
d_e	: 伝熱直径, $(= 4(W \cdot h)/W)$
Fo	: フーリエ数, 式(6)
Fo^*	: 修正フーリエ数, 式(9)
H	: 試験部高さ ($H = 155 \text{ mm}$)
h	: 流路厚さ
K	: 擬塑性粘度, 式(2)
M_p	: 流入ポリエチレン質量
M_r	: ポリエチレン流入質量比, 式(1)
M_0	: 最大流入ポリエチレン質量
M^*	: 修正無次元流入ポリエチレン質量, 式(5)
n	: べき指数, 式(2)
P_a	: 押込み空気圧力
P_{in}	: 試験部入口圧力
Q_c	: ブライン流量
Re	: レイノルズ数, 式(1)
Ste	: ステファン数, 式(1)
T	: 温度
T_f	: 高密度ポリエチレンの融点 ($= 132.8^\circ\text{C}$)
T_{pin}	: 試験部入口における溶融ポリエチレン温度
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
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
θ_c	: 冷却温度比, 式(1)
ρ	: 密度

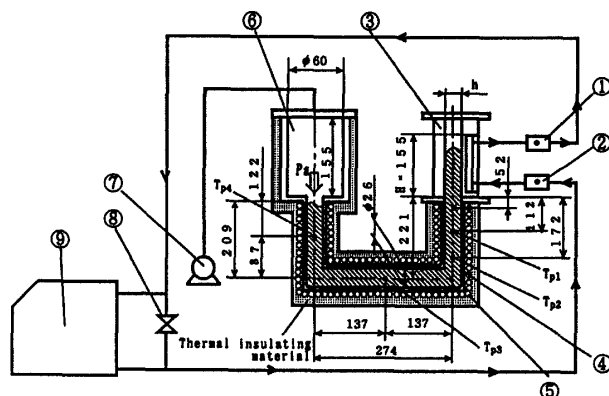
添字

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

図1に実験装置の概略を示す。本実験装置は、矩形の溶融プラスチック流路を有する試験部③、プラスチックの加熱・溶融のための樹脂溶融部⑥、および試験部冷却用ブラインの循環ループにより構成されている。樹脂溶融部は、内直径60 mm × 厚さ3 mm × 高さ155 mmの鋼製の樹脂タンク⑥からなり、内径26 mm × 外径28.6 mmの銅製パイプ④にて試験部③と連結されている。試験ポリエチレンである高密度ポリエチレンは、樹脂タンク⑥内に設置されたパイプ状電気ヒータ(容量1 kW)および銅製パイプ④外周に一樣なピッチにて巻かれたガラス繊維被覆のニクロム線電気ヒータ⑤にて加熱・溶融そして保温される。銅製パイプ④内には、溶融ポリエチレン温度測定用のK型熱電対4組(図1中、 $T_{p1} \sim T_{p4}$, 測定精度 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 以内)が設置されており、これら熱電対の指示が所定の一定温度($\pm 0.2^\circ\text{C}$ 以内)になるように前述の各電気ヒータへの入力調整される。このようにして溶融ポリエチレン樹脂を所定の温度 T_{pin} [$^\circ\text{C}$]に設定した後、コンプレッサー⑦により樹脂タンク内を任意の押し込み圧力 P_a [Pa]に加圧し、溶融ポリエチレン樹脂を試験部へと流動させる。この際、試験部入口における溶融ポリエチレン樹脂圧力 P_{in} [Pa]は、試験部の上流(下方)52 mmに取り付けられたダイヤフラム式圧力センサー(測定精度 $\pm 3\%$ 以内)により測定され、データ収録システムを介してパーソナルコンピュータに記録される。試験部における溶融ポリエチレン樹脂冷却のための冷却ブラインは(図1中、太実線)、温調器⑨およびバイパスバルブ⑧により、所定の一定温度および一定流量にて試験部に供給される。また、冷却ブライン温度 T_b は、試験部出入口に設けられた混合室①、②にて素線径0.32 mmのK型熱電対を用いて測定された(測定精度 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 以内)。なお、周囲環境への熱損失低減のため、本実験装置は厚さ50 mmのグラスウール断熱材にて注意深く覆われている。

図2に試験部の詳細を示す。試験部は、幅 $W = 82 \text{ mm} \times$ 厚さ h (可変) $\times$ 全高216 mmの矩形構造である。図2に示



- | | |
|-------------------------|---|
| ① Outlet mixing chamber | ⑥ Tank for molten-high density polyethylene |
| ② Inlet mixing chamber | ⑦ Compressor |
| ③ Test section | ⑧ By-pass valve |
| ④ Copper tube | ⑨ Brine temperature controller |
| ⑤ Electric wire heater | × Pressure transmitter |
| • Thermocouple | |

図1 実験装置の概略

されるように、試験部の一側面は厚さ 3 mm の銅製冷却面となっており、また、溶融ポリエチレン樹脂の流動・凝固挙動の可視観察が可能となるように、側面にはパイレックスガラス板(厚さ 10 mm)が、冷却面の対向壁には透明樹脂であるポリサルホン板(厚さ 10 mm)が用いられており、これらの各部材は上下に設けたステンレス板により支持されている。なお、流路厚さ h は、 $h = 5$ mm, 7 mm および 10 mm の 3 種類に設定した。銅製冷却板には、冷媒ブラインの流路である幅 82 mm × 深さ 5 mm の溝が、試験部入口より $y = 23$ mm から $y = 155$ mm にわたって設けられている。銅製冷却面温度 T_w の測定は、試験部入口より $y = 35$ mm, 55 mm, $\dots$, 135 mm の 6 個所にて K 型熱電対により行われた(測定精度 ± 0.2 °C 以内)。以下本文においては、それぞれの位置における冷却面温度を、試験部下方より順に、 T_{w1} , T_{w2} , $\dots$, T_{w6} と呼ぶ。また、予備実験において $0 \text{ mm} < y < 155 \text{ mm}$ の冷却面温度の一様性が確認されたことより、後述の実験結果の整理においては、試験部高さとして $H = 155 \text{ mm}$ を採用してある。一方、流路側壁面におけるポリエチレンの凝固を避けるため、ガラス製流路側壁の外側にはさらにガラス板が設置されており、これら 2 枚のガラス板により形成される空間の温度をポリエチレンの融点 $T_f = 132.8$ °C⁽⁵⁾ 付近に保つことにより、ガラス板表面でのポリエチレンの凝固を回避してある。さらに、冷却面の対向壁であるポリサルホン板も、その背後に取り付けたニクロム線ヒータにより $T_f = 132.8$ °C 近くに保温し、試料の凝固を防止してある。

実験は以下の手順に従って行われた。まず、樹脂溶融部内にペレット状の高密度ポリエチレン樹脂を投入し、電

気ヒータによりポリエチレン樹脂の加熱・溶融を行う。この際、電気ヒータへの入力電圧の調節により、樹脂溶融部内の溶融ポリエチレン樹脂を所定の温度に保つ。次いで、コンプレッサーにより樹脂タンク内に空気圧を印可し、溶融ポリエチレンを試験部へと流入させる。試験部下方より流入した溶融ポリエチレンは、冷却板からの冷却により凝固し、流動を停止する。この間の流動・凝固状態を、観察窓を通じてビデオカメラに収録し、後の解析に使用した。なお、本実験は以下の範囲で行われた。

ポリエチレン温度	$T_{pin} = 140 \sim 180$ °C
冷却板伝熱面平均温度	$T_{wm} = 50 \sim 120$ °C
溶融ポリエチレンの押込み圧力	$P_a = 49.7 \sim 196$ kPa
ブライン流量	$Q_c = 0.48 \sim 0.55$ m ³ /s
流路厚さ	$h = 5, 7, 10$ mm

なお、本供試ポリエチレン樹脂である高密度ポリエチレン(融点 $T_f = 132.8$ °C)の各種物性値については、前報⁽⁵⁾を参照されたい。

3. 実験結果および考察

3.1 溶融ポリエチレンの流動・凝固挙動

図 3 は、流路厚さ $h = 5$ mm、押し込み圧力 $P_a = 96.1$ kPa、ポリエチレン流入温度 $T_{pin} = 181.4$ °C、初期冷却面平均温度 $T_{wm} = 71.3$ °C の条件における、冷却面温度 T_w 、試験部入口圧 P_{in} 、ポリエチレン先端位置 y およびポリエチレン先端移動速度 u の経時変化を示したものである。なお、ポリエチレン先端位置 y およびポリエチレン先端移動速度 u は、ビデオ撮影によるポリエチレン先端移動状況を画像処理して求めたものである。また、図 4(a) ~ (d) は、図 3(b) 中の記号 (a) ~ (d) にて示す各時刻における溶融ポリエチレンの流動・凝固様相のスケッチを、図 4(e) は、凝固完了後 ($t = 300$ 秒) のポリエチレン形状を示してある。

流入開始後 $t = 20$ 秒の図 4(a) に示されるように、試験部下方より流入した溶融ポリエチレンの一部は冷却面上にて凝固し、凝固層いわゆるスキン層を形成する。この凝固層は、流入部である下方で薄く、下流の上方に向かうほど徐々に厚さを増大させるが、先端部においては高温の溶融樹脂が新たに供給されるため、凝固層厚さの減少が見られる。次いで、 $t = 40$ 秒の図 4(b) においては、凝固層はさらに成長し、先端付近では流路のほぼ半分を凝固層が占めることになる。また、この時刻における先端位置は $y \approx 67$ mm で、これは流入完了時の先端位置 $y = 82$ mm (図 3(b) 参照) の約 82 % に相当することより、比較的初期の段階においてポリエチレンの充填がほぼ完了することが理解できる。さらに、 $t = 60$ 秒(図 4(c))に至ると、樹脂先端部は完全に凝固層で覆われ、先端部への溶融樹

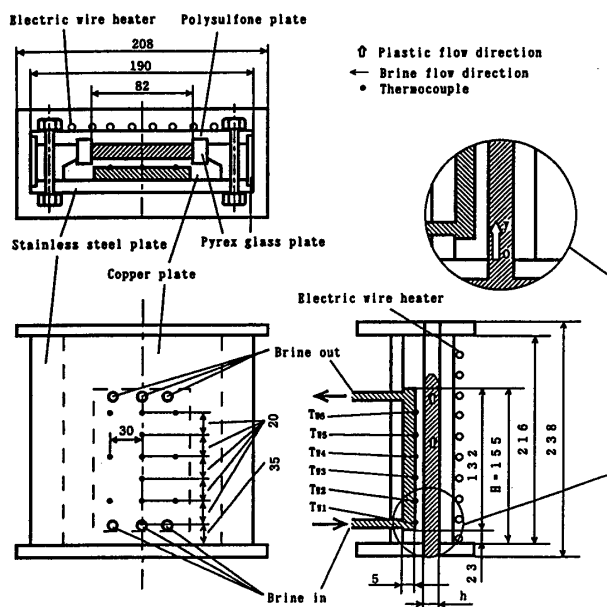


図 2 試験部の詳細

脂の供給がなくなる。しかしながら、この後も樹脂は壁面上を滑りながらゆっくりと上昇し、最終的には、 $t = 90$ 秒(図4(d))で流動が停止する。なお、先端部が凝固層で覆われてからの先端移動距離は約6.5 mmであり、全充填高さ82 mmに対して約8%程度と比較的小さなものであった。以上に述べたように、時間の経過と共に、凝固層の発達に伴う流路断面積の減少、さらに、流入高さ(流路長)の増大に伴う流動抵抗の増加のため、図3(b)に観察されるように、ポリエチレン先端移動速度 u は、流入直後に最大値 u_{in} を示した後、急激に減少し、 $t = 25$ 秒以降では $u < 1$ mm/sの低速度となり、最終的に $t_f = 90$ 秒で流動を停止する。 $t = 300$ 秒の凝固完了後のポリエチレンは、凝固および温度降下に伴う体積収縮のため、図4(e)に示されるような先端部のひけた形状となる。なお、本実験においては、凝固後のポリエチレンを試験部から取り出し、そ

の質量を電子天秤にて計測し、ポリエチレン充填量 M_p を求めた。一方、図3(b)中の一点鎖線で示される試験部入口圧力 P_{in} は、速度の急激に減少する実験開始直後に大きく増加し、その後緩やかに増加した後、最終的に押し込み圧力 $P_a = 96.1$ kPaに等しくなる。また、図3(a)の冷却面温度 T_w の経時変化に示されるように、ポリエチレンの流入前($t < 0$)における冷却面温度は 0.6°C 以内で一致しており、さらに、高温の溶融ポリエチレン流入後の温度上昇も 3.2°C 以内と、比較的一定温度に近い冷却壁温条件で実験が行われていることが確認できる。このことから、後述の実験結果の整理に際しては、試験部流入前の初期冷却面平均温度 T_{wm} (以下、冷却面温度と略す)を採用してある。

図5は、試験へ最終的に流入したポリエチレン質量 M_p と溶融ポリエチレン入口温度 T_{pin} の関係を、試験部流路厚さ $h = 5$ mm、押し込み圧力 $P_a = 96.1 \sim 100.0$ kPaの場合を例に、冷却面平均温度 T_{wm} をパラメータとして示したものである。なお、図5の横軸には、溶融ポリエチレン入口温度 T_{pin} とポリエチレンの融点 T_f の温度差($T_{pin} - T_f$)を用いてある。また、図5中に破線で示される $M_0 = 56$ gは、試験部が完全にポリエチレンに満たされた場合の流入ポリエチレン質量である。図5に見られるように、冷却面温度 T_{wm} 一定の条件では、流入ポリエチレン温度

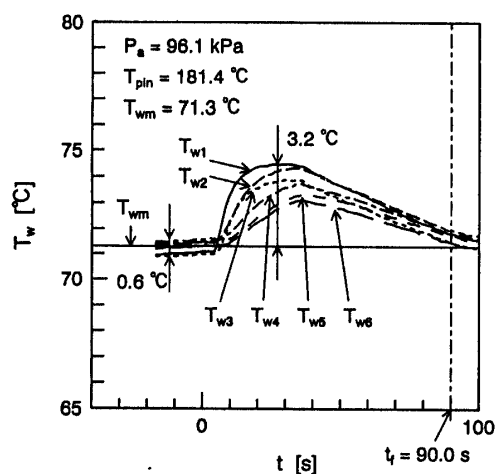
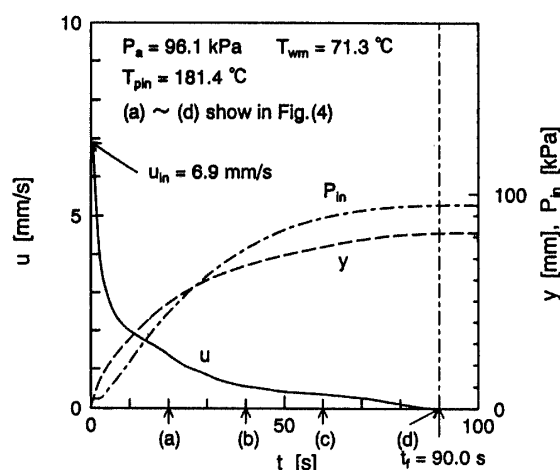
(a) T_w の経時変化(b) P_{in} , y , u の経時変化

図3 溶融ポリエチレン流入圧力 P_{in} 、先端位置 y 、先端移動速度 u および冷却面温度 T_w の経時変化

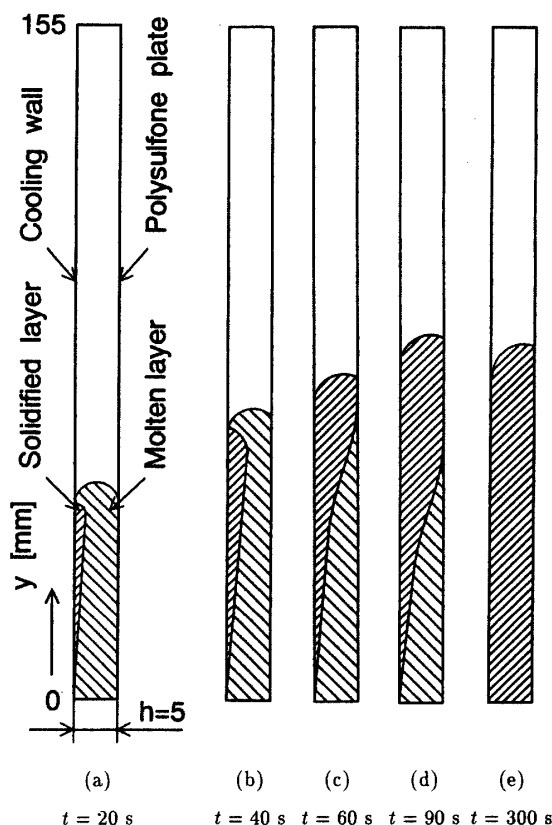


図4 溶融ポリエチレンの流動・凝固挙動

$(T_{pin} - T_f)$ の増大と共に、流入ポリエチレン質量 M_p の増大となることがわかる。特に、初期冷却面温度 $T_{wm} \approx 110^\circ\text{C}$ の場合には、 $(T_{pin} - T_f) > 25^\circ\text{C}$ の流入ポリエチレン温度条件にて試験部が完全に充填されることになる。このように、ポリエチレン流入温度 T_{pin} の上昇に伴い流入ポリエチレン質量 M_p が増大するのは、流入ポリエチレン温度の上昇と共に溶融ポリエチレンから凝固層に伝わる熱量が増大し、凝固層の発達が緩慢となることや、溶融ポリエチレンの粘性が温度の上昇と共に低下することが原因と考えられる。一方、流入ポリエチレン温度 $(T_{pin} - T_f)$ 一定の条件では、冷却面温度 T_{wm} の上昇と共に流入ポリエチレン質量 M_p の増大となることも図5より理解できる。

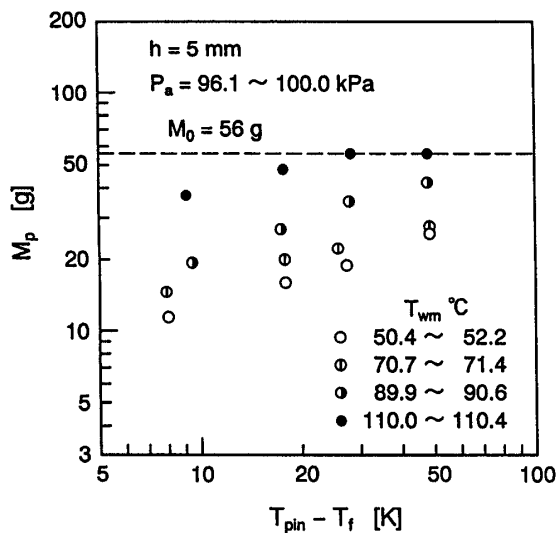


図5 流入質量 M_p に及ぼすポリエチレン流入温度 T_{pin} の影響

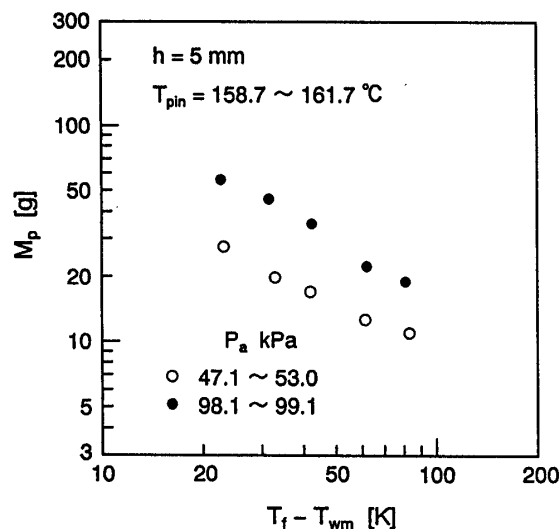


図6 流入質量 M_p に及ぼす冷却面温度 T_w の影響

流入ポリエチレン質量 M_p に及ぼす初期冷却面温度 T_{wm} の影響をさらに詳しく検討するために、試験部流路厚さ $h = 5\text{ mm}$ 、流入ポリエチレン温度 $T_{pin} = 158.7 \sim 161.7^\circ\text{C}$ に関する実験値を、押し込み圧力 P_a をパラメータにプロットしたものが図6である。なお、図6の横軸には、ポリエチレンの凝固点 T_f と初期冷却面温度 T_{wm} の温度差 $(T_f - T_{wm})$ を採用してある。図6から明らかなように、押し込み圧力 P_a 一定の条件では、冷却面温度 T_{wm} の低下、すなわち $(T_f - T_{wm})$ の増加に伴い、流入ポリエチレン質量 M_p は単調に減少している。この原因としては、冷却面温度 T_{wm} の低下に伴い凝固層の発達が急速に行われるために、最終的に流入ポリエチレン質量 M_p の減少となると考えられる。

次いで、流入ポリエチレン質量 M_p に及ぼす押し込み圧力 P_a の影響を示したものが図7である。なお、図7には、流路厚さ $h = 5\text{ mm}$ 、冷却面温度 $T_{wm} = 89.5 \sim 91.8^\circ\text{C}$ に関する実験結果を、流入ポリエチレン温度 T_{pin} をパラメータにプロットしてある。図7に示されるように、流入ポリエチレン温度 T_{pin} 一定のもとでは、押し込み圧力 P_a の増加に伴い流入ポリエチレン質量 M_p は単調に増加し、ある押し込み圧力以上では試験部を完全にポリエチレンが充填する ($M_p = M_0 = 56\text{ g}$) ことになる。この主な原因としては、押し込み圧力 P_a の増大に伴い、後述の図9に見られるように、試験部へのポリエチレンの流入速度 u が増加することが考えられる。

図8は、流入ポリエチレン質量 M_p に及ぼす流路厚さ h の影響を、押し込み圧力 $P_a = 47.1 \sim 51.0\text{ kPa}$ 、初期冷却面温度 $T_{wm} = 48.9 \sim 51.5^\circ\text{C}$ の実験条件を例に示したものである。図8より明らかなように、流入ポリエチレン温度 T_{pin} 一定の条件下では、流路厚さ h の増大と共に流入ポ

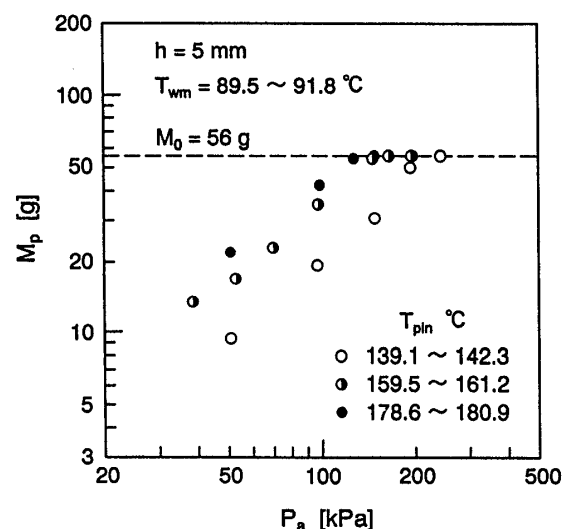


図7 流入質量 M_p と押し込み圧力 P_a の関係

リエチレン質量 M_p の増加が観察される。この原因としては、流路厚さ h の増加すなわち流路断面積の増加による流動抵抗の減少や、流路厚さ h の増大と共に凝固層が対向壁に至り、流路を閉塞するまでに長時間を要することが考えられる。

次節の無次元整理に先立ち、押し込み圧力 P_a の扱いに関して若干の考察を行う。本実験のように、樹脂タンクへの加圧により溶融ポリエチレンを流動させる場合には、試験部の上流側にある導入管の影響は避けられないものと考えられ、さらに、図3(b)でも見られたように、ポリエチレンの移動速度は時々刻々と変化するものとなっている。しかしながら、図9の流入直後のポリエチレン流速 u_{in} と押し込み圧力 P_a の関係に見られるように、押し込み圧力 P_a の増大と共に流入直後のポリエチレン流速

u_{in} の増加が見られ、両者には良い相関関係があることより、前報⁽⁵⁾と同様、実験結果の無次元整理には流入直後のポリエチレン流速 u_{in} を採用し、より一般性のある無次元整理を試みる。

3.2 流入ポリエチレン質量の無次元整理

ここでは、流入ポリエチレン質量 M_p に及ぼす諸因子の効果の無次元整理を試みる。前節で議論したように、流入ポリエチレン質量 M_p は、流入ポリエチレン温度 T_{pin} 、冷却面温度 T_{wm} 、ポリエチレン流速 u_{in} 、流路厚さ h 、さらに、凝固層の発達に関連して、ポリエチレンの凝固潜熱 L およびポリエチレンの顕熱等に依存すると考えられる。従って、前報⁽⁵⁾と同様、流入ポリエチレン量は次の無次元量の関数で表現されると考えられる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{ポリエチレン流入質量比} \quad M_r = M_p/M_0 \\ \text{冷却温度比} \quad \theta_c = \frac{(T_f - T_{wm})}{(T_{pin} - T_f)} \\ \text{ステファン数} \quad Ste = \frac{u_{in} h}{\alpha} \\ \text{レイノルズ数} \quad Re = \rho u_{in} h / \mu \end{array} \right\} \quad (1)$$

ここで、 c_p^* は見掛けの比熱から潜熱分を差し引いた比熱、 $d_e = 4(W \cdot h)/W = 4h$ は伝熱等価直径、 K および n は次式(2)で定義される溶融ポリエチレンの擬塑性粘度およびべき指数、 M_0 は試験部を完全にポリエチレンが充填した場合の流入ポリエチレン質量で、それぞれの流路厚さ h に対して次の値をとる。 $M_0 = 56.0 \text{ g}$ ($h = 5 \text{ mm}$)、 $M_0 = 78.4 \text{ g}$ ($h = 7 \text{ mm}$)、 $M_0 = 112 \text{ g}$ ($h = 10 \text{ mm}$)。溶融ポリエチレンは非ニュートン流体の範疇に属するもので、その見掛け粘度 η は、温度 T およびせん断速度 γ の関数として次式で表される⁽⁵⁾。

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

ここで、 $n = 0.757$ 、 $A = 1.13 \times 10^5$ 、 $B = -3.67 \times 10^{-3}$ である。以下、ポリエチレン流入質量比 M_r に及ぼす各無次元パラメータの影響について考察する。

図10は、冷却温度比 $\theta_c = 1.26 \sim 1.41$ におけるポリエチレン流入質量比 M_r とレイノルズ数の関係を、流路厚さ h およびステファン数 Ste をパラメータに示したものである。なお、図9に示されるように、本実験におけるポリエチレン流速 u_{in} は、数～十数 mm/s と小さいことから、レイノルズ数 Re の値も非常に小さなものとなっている。図10において、ポリエチレン流入質量比 M_r は、 $M_r \propto Re^{1.26}$ とレイノルズ数 Re の増加に伴い顕著に増加する結果となっている。この原因としては、本実験のように低レイノルズ数 Re 条件においては、対流熱伝達による凝固層の成長促進効果も小さいものと考えられ、流速の増加に伴う流入量の増加が顕著に現れたものと考えられる。ま

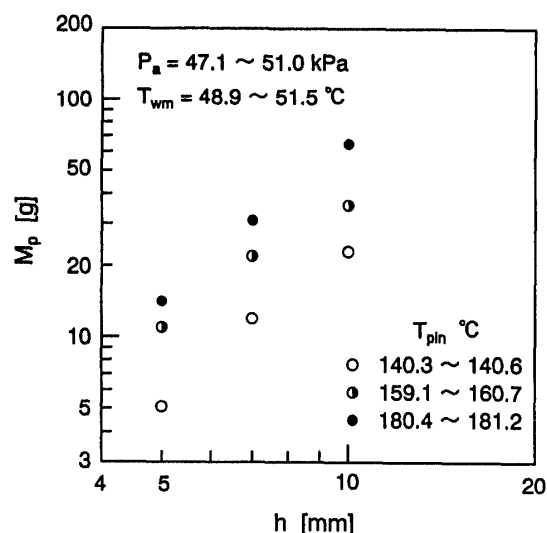


図8 流入質量 M_p と流路厚さ h の関係

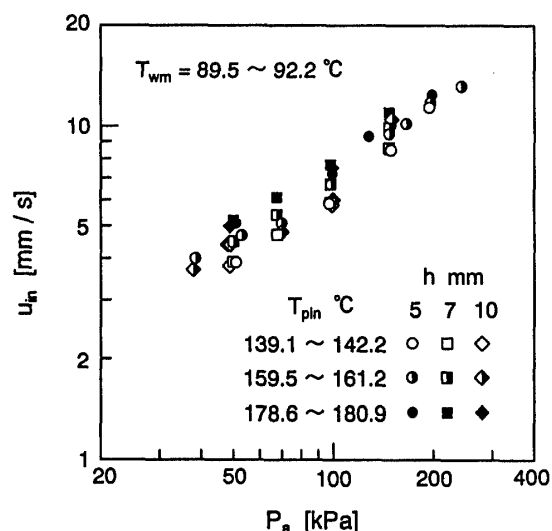


図9 流入速度 u_{in} と押し込み圧力 P_a の関係

た、レイノルズ数一定の条件では、ステファン数 Ste の低下に伴うポリエチレン流入質量比 M_r の増加が見られるが、このことに関しては後の図12にて述べる。一方、流路厚さ h の違いによるポリエチレン流入質量比 M_r の差は余り見られず、パラメータとしてレイノルズ数 Re を採用したことにより、流路厚さ h の効果を良好に表現できたものと言えよう。

図11は、レイノルズ数 $Re = 1.21 \times 10^{-6} \sim 1.28 \times 10^{-6}$ 、ステファン数 $Ste = 0.349 \sim 0.390$ における、ポリエチレン流入質量比 M_r と冷却温度比 θ_c の関係を示したものである。なお、 θ_c の定義式(1)に示されるように、ステファン数 Ste 一定における θ_c の増加は、物理的には冷却面温度 T_{wm} の低下を意味している。このことから容易に理解できるように、ポリエチレン流入質量比 M_r は θ_c の増加

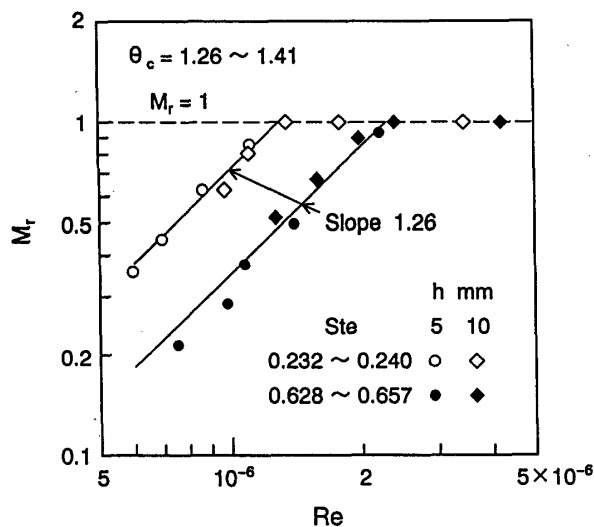


図10 ポリエチレン流入質量比 M_r とレイノルズ数 Re の関係

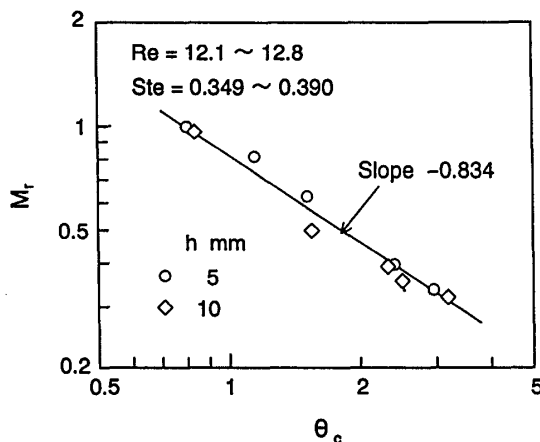


図11 ポリエチレン流入質量比 M_r と冷却温度比 θ_c の関係

に伴い直線的に低下しており、その依存性は $M_r \propto \theta_c^{-0.834}$ で表される。

図12は、冷却温度比 $\theta_c = 1.33$ 、レイノルズ数 $Re = 1.3 \times 10^{-6}$ における、ポリエチレン流入質量比 M_r とステファン数 Ste の関係を示したものである。なお、冷却温度比 θ_c 一定の条件でステファン数 Ste 数を増加させた場合には、流入ポリエチレン温度 T_{pin} の増加と同時に、冷却面温度 T_{wm} も低下していることに注意されたい。図12において、ポリエチレン流入質量比 M_r はステファン数 Ste の増加に伴い減少傾向にあり、これらの間には $M_r \propto Ste^{-0.675}$ の関係がある。このように、ポリエチレン流入質量比 M_r は、流入ポリエチレン温度 T_{pin} の影響よりも冷却面温度 T_{wm} の影響を強く受ける結果となっている。

以上の結果より、試験部が完全にポリエチレンに満たされないポリエチレン流入質量比 $M_r < 1$ に関する実験結果は、次式の形式にて整理される。

$$M_r = C Ste^{n_1} \theta_c^{n_2} Re^{n_3} \dots \dots \dots (3)$$

上式(3)中の係数 C および各指数 n_1, n_2, n_3 の値を最小2乗法を用いて決定することにより、本実験結果を標準偏差 $\sigma = \pm 9.1\%$ にて近似する次式を得た。

$$M_r = 1.08 \times 10^7 Ste^{-0.675} \theta_c^{-0.834} Re^{1.26} \dots \dots \dots (4)$$

$$M_r^* = M_r / (Ste^{-0.675} \theta_c^{-0.834}) = 1.08 \times 10^7 Re^{1.26} \dots \dots \dots (5)$$

図13は、 $M_r < 1$ に関する全実験データを、式(5)にて定義した M_r^* とレイノルズ数 Re の関係にてプロットしたもので、本実験結果が式(5)と良く一致していることがわかる。

以上の議論においては、試験流路へのポリエチレン充填量に着目した整理を行ったが、ポリエチレンの流入開始より充填完了までの時間 t_f も重要な因子となる。従っ

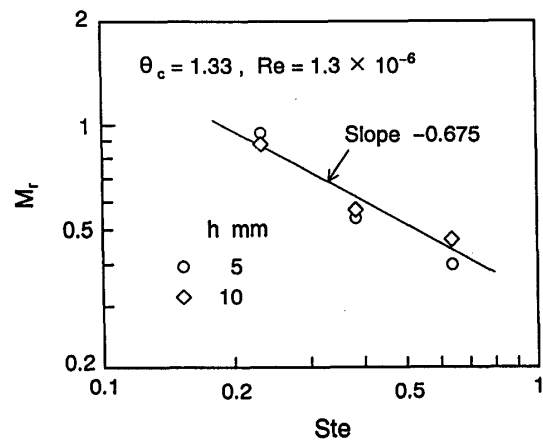


図12 ポリエチレン流入質量比 M_r とステファン数 Ste の関係

て、無次元充填完了時間であるフーリエ数 Fo を次式に定義し、実験結果の整理を行った。

$$Fo = at_f/d_c^2 \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 a はポリエチレンの熱拡散率である。前述のポリエチレン流入質量比 M_r の整理法を参考にすれば、フーリエ数 Fo は次式の形式にて表される。

$$Fo = C Ste^{n_1} \theta_c^{n_2} Re^{n_3} \dots\dots\dots (7)$$

ポリエチレン流入質量比 $M_r < 1$ に関する実験結果に対して最小2乗法を適用することにより、本実験結果を標準偏差 $\sigma = \pm 6.9\%$ で近似する次式を得た。

$$Fo = 9.07 \times 10^2 Ste^{-0.586} \theta_c^{-0.760} Re^{0.719} \dots\dots\dots (8)$$

$$Fo^* = Fo / (Ste^{-0.586} \theta_c^{-0.760}) = 9.07 \times 10^2 Re^{0.719} \dots\dots\dots (9)$$

図14は、 $M_r < 1$ に関する全実験データを、式(9)で定義した修正フーリエ数 Fo^* とレイノルズ数 Re の関係にて示したもので、本実験結果が式(9)と良く一致していることがわかる。

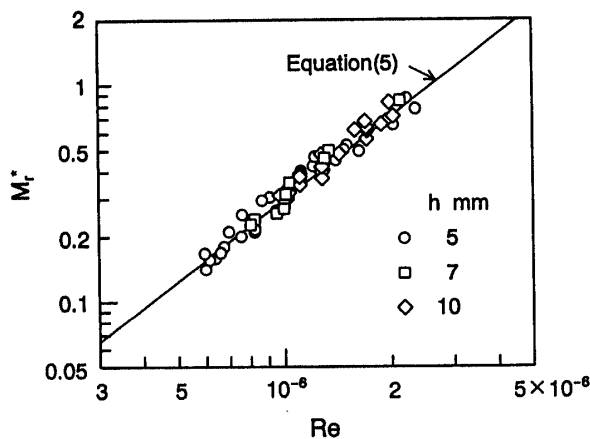


図13 M_r^* と Re の関係

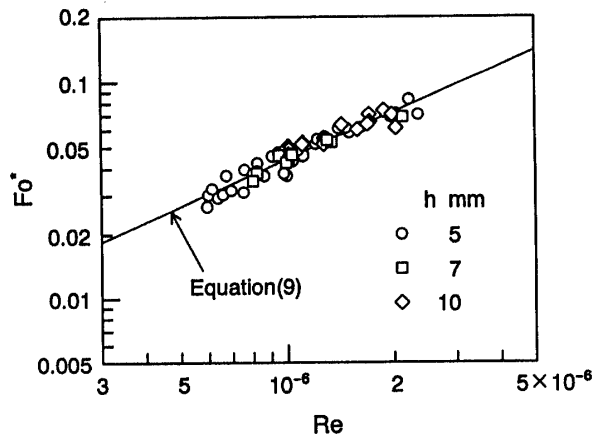


図14 Fo^* と Re の関係

4. 結論

比較的厚い矩形状空隙に、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・凝固現象に及ぼすポリエチレン流入温度、流入速度、冷却伝熱面温度および流路厚さの影響を実験的に検討し、次のような結論を得た。

(1) 矩形状空隙に流入した溶融ポリエチレンは、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に伴う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) 矩形状空隙への溶融ポリエチレンの最終流入質量と流入完了時間に及ぼすポリエチレン流入温度、流入速度、冷却面温度および矩形流路厚さの関係が定量的に明らかとなった。

(3) さらに、無次元流入質量と無次元流入完了時間を、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) 稲葉, 池上, 尾崎, 機論, 60-574, B(1994).