薄肉射出成形時における射出速度減速要因の解明

菅 沼 雅 資^{*1,*2}・斎 藤 保 典^{*2}・野 村 彰 夫^{*2}

Studies on the Slow-down Factors of Injection Velocity during Thin Wall Molding Processes

SUGANUMA, Masashi^{*1,*2}/SAITO, Yasunori^{*2}/NOMURA, Akio

In order to clarify the slow-down factors of injection velocity during thin wall molding (thickness below 0.25 mm) processes in an injection molding machine, we have studied experimentally the dependence of the injection velocity on the following three factors: (1) slip of an electric induction motor for an oil hydraulic pump, (2) characteristics of the oil hydraulic pump and (3) compression of an oil hydraulic fluid, which are related to the change of pressure load in a mold. The influence of each factor on the injection velocity was evaluated quantitatively by using a modified injection molding machine and a test flow mold. From experimental results, it was found that the slow-down of injection velocity mainly depended on the compression of oil hydraulic fluid.

Key words: Injection molding/Thin molding/Slowdown of injection velocity/Compression of oil hydraulic fluid

1. 緒 言

射出成形品は、自動車部品、家庭電化製品、光学部品、医療製品、食品パッケージ、日用雑貨などのあらゆる分野で活用されているが、その形状がますます薄肉化に向かっている。射出成形品における薄肉の定義は明確になってはいないが、一般的には0.8 mm以下を指すことが多い。最近では、0.3 mm以下の薄肉成形品を射出成形法で製造することが可能になってきている。薄肉成形加工では金型内の樹脂流路が狭く、ノズルより射出された溶融樹脂は金型壁面での熱移動で冷却が急速に進み、その結果樹脂の粘性が増して流動抵抗（負荷圧力）が急激に大きくなり、これが充填不足

を起こす原因となっている。油圧を駆動源とする射出成形機においては、充填不足の対策として樹脂充填中の負荷変動に対してスクリュ前進速度（射出速度）を一定に保つ制御を可能とするために、圧力設定値を負荷圧力より高くすることで、充填樹脂量を十分に確保する方法¹⁾がとられている。具体的には、金型内へ樹脂を一定の射出速度で充填し、充填完了とともに負荷圧力が圧力設定値に近づくと射出速度は減速を開始して圧力制御に移行してゼロになる。そして、ゲートシールが完了するまでの溶融樹脂の圧縮特性を利用して保圧制御が行われ、成形品が完成する。一方、樹脂の圧縮による残留応力から生じる加工品のひずみを避けるために、充填中の設定圧力を低くして、さらに、意図的に射出速度の減速を早めに行う成形法²⁾もあるが、一般には前述した方法がとられており、本研究でもこの方法が対象となっている。

ところで、薄肉成形加工時の射出充填途中に、負荷圧力の急激な増加に伴い圧力設定値に近づく前に射出速度が減速する挙動、すなわち射出率の低下³⁾が確認されており、その結果充填不足が起こる問題が出てきている。従来、充填不足の要因として、樹脂の圧縮効果⁴⁾やスクリュ前進中に発生するスクリュ逆止弁から

^{*1} 日精樹脂工業㈱ 技術研究所
長野県埴科郡坂城町南条 2110 (〒 389-06)
Technical research Center
Nissei Plastic Industrial Co., Ltd.
2110 Minamijo, Sakaki-machi, Hanisina-gun, Nagano-ken, 389-06 Japan

^{*2} 信州大学 工学部
長野市若里 500 (〒 380)
Faculty of Engineering, Shinshu University
500 Wakasato, Nagano-shi, 380 Japan
1997.6.23 受理

そこで、本研究では、薄肉成形時に金型内の急激な負荷圧力の増加による射出速度の減速現象の要因を解明することを目的として、薄肉部 0.25 mm の金型を用いた射出成形機により、負荷圧力の増加時における射出速度の動特性について実験的に検討を行った。減速の要因は、成形機の油圧制御系にあると仮定して、次の三つの要素、(1) 油圧ポンプ用電動機回転速度の減速、(2) 油圧ポンプの吐出流量の減少、(3) 作動油の圧縮特性に着目して、それぞれの要素の射出速度減速への寄与について検討を行う。

ここでは、実験用に改造した射出成形機とそれを用いた実験方法について詳しく述べる。システム構成のブロック図を Fig.1 に示し、成形機本体システムの仕

直圧方式の型締型開機構と回転ラムインラインスクリュ方式の射出機構で構成されている射出成形機を、実験用に改造した。射出シリンダーの油圧を測定するための圧力センサー 1 (Pressure Sensor 1) と、射出成形機の油圧の駆動源となる可変容量形油圧ピストンポンプ (可変吐出ポンプ) を駆動する三相かご形誘導電動機の回転速度を測定するためのパルスセンサー 1 (Pulse Sensor 1)、そして、スクリュ回転用油圧モーターの回転速度を測定するためのパルスセンサー 2 (Pulse Sensor 2) をそれぞれ取り付けた。また、可変吐出ポンプの流量と圧力の特性を実験より求めるために、油圧モーターの戻りライン (タンクライン) に圧力制御弁 (Relief Valve) を油圧回路に追加した。そして、作動油の圧縮特性を示す体積弾性係数 k を実験より求めるために、射出シリンダーから圧縮された

a. Injection machine	Type : FN1000 (Nissei Plastic Industrial Co., Ltd.) Inject. capacity : 127×10^{-3} (l/shot) Inject. pressure : 178 (MPa) Inject. rate : 125×10^{-3} (l/s) Screw diameter : 36 (mm) Plast. rate : 52 (kg/h) Clamp force : 794×10^3 (N) Nozzle hole : 3 (mm) Nozzle R : 10 (mm) Controller : NC21 Open Loop Control
b. Three phase induction motor	Type : TIKK-VCKL21 (Toshiba) Output : 15 (kW) Poles : 4 (p) Input voltage : AC200~220 (V) Input frequency : 60 (Hz)
c. Oil hydraulic pump	Type : A70-FR04E140A (Yuken) Displacement : 70×10^{-3} (l/rev) Working press. : 13.7 (MPa)
d. Oil hydraulic motor	Type : ME-350 (Sumitomo) Displacement : 350×10^{-3} (l/rev) Rate speed : 600 (rpm)
e. Oil hydraulic fluid	Type : DAPHNE-Neo-Fluid (Idemitsu) Viscosity at 40°C : 44.7 (cSt)
f. Relief valve	Type : JRP-G02-3-N-30 (Daikin) Pressure range : 0.9~20.5 (MPa)
g. Rubber hose	Type : PA1412 (Bridgestone) Diameter : 19 (mm) Length : 1000 (mm)

Table 2 Specifications of sensors used in the experiment

1. Pressure sensor 1	Type : ETP P-M-HHD-10 (Tokimec) Pressure range : 0~19.6 (MPa) Output voltage : DC 0~10 (V)
2. Pulse sensor 1 sensor 2	Type : E6A2 (Omron) Resolution : 200 (pulse/rev) Response : 30×10^3 (Hz)
3. Position sensor	Type : E6B2 (Omron) Resolution : 600 (pulse/rev) Response : 100×10^3 (Hz)
4. A/D (analogue/digital converter)	Type : NR-100 (Keyence) Resolution : 14 (bit) Sampling : 20×10^{-6} (s)
5. Personal computer	Type : PC-486 (Epson)

作動油を抜くためのバルブ (Valve) を追加した。本実験の射出成形機は、マイクロコンピュータ搭載の制御装置 (NC 21) で制御されており、射出速度と圧力はオープンループ制御で行われている。すなわち、実際に動作している射出速度または圧力を帰還して制御する、いわゆるフィードバック制御は行われていない。スクリューと連結されているピストンには、位置を検出するための位置センサー (Position Sensor) が取り付けられており、このセンサーにより得られた変位を時間微分することによって射出速度を求めた。具体的には、塩入らが提案した Δt 法⁹⁾ (サンプリング間隔 5 ms) による 5 点の移動平均値で行った。

2.2 油圧制御系

ここで使用している可変吐出ポンプ⁹⁾は、三相かご形誘導電動機を駆動源として、ロードセンシング方式によるピストンを用いた油圧ポンプである。作動油タンクより作動油を吸い込み、ピストンの往復運動で作動油を吐出する。吐出流量はピストンのストローク量により変化し、ストローク量はピストンが連結されている斜板 (Swash Plate) の傾き量によって決まる。したがって、この斜板の傾き量を制御することで吐出流量が制御可能となる。傾き量の制御には電磁比例弁が用いられており、傾き量を検出する位置センサー (Potentio Sensor) と吐出圧力を検出する圧力センサー 2 (Pressure Sensor 2) が内蔵されている。ポンプはこれらのセンサーを使用して、射出成形機の制御装置から出力された流量と圧力の設定値と一致するようにフィードバック制御が行われている。流量制御中に圧力設定値と負荷圧力の偏差が小さくなると、圧力制御に移行される。制御ブロック図を Fig.2 に示す。

油圧モーターは、樹脂を可塑化計量するためのスク

Fig.2 Block diagram of oil hydraulic pump

Fig.3 Variations of flow rate with oil motor speed

リュ回転に使用されているとともに、可変吐出ポンプの流量測定にも用いられている。油圧モーターの流入量と回転速度の関係を Fig.3 に示す。また、実験油圧回路で用いたゴムホースの仕様を Table 1 に示す。

ここで使用している作動油 (ダフニーネオフルイド 46 : 出光興産) は、動粘度 (viscosity) が 46 cSt 相当のものである。しかし、本実験では重要なパラメータなので、事前にこの油の動粘度を求めた結果、測定温度 40℃で 44.7 cSt であった。

2.3 金型と成形条件

実験用金型 (テストフロー金型) の概観と成形品の形状を Fig.4 (a), (b) に示す。テストフロー金型はダイレクトゲートで、直径 55 mm、厚さ 3 mm の円盤とさらに上下方向に幅 30 mm、厚さ 0.25 mm で末端部開口の隙間がある。肉厚部の円盤に樹脂が充填されて上下方向の薄肉部へ流れ込むと、樹脂流路が極端に狭くなり、流動抵抗が急激に増加する。さらに薄肉部での金型壁面での熱移動が急速に進み、樹脂の粘度が急上昇して流動抵抗すなわち負荷圧力の増加が促進される。すなわちこの金型は、樹脂充填中に急激な負荷変動圧力を発生できる構造になっている。次に予備実験で使用した成形品の形状は、縦 54 mm、横 85 mm、薄肉部 0.25 mm の平板である。実験時の成形条件と樹脂の仕様を Table 3 に示す。

(a)

(b)

Fig.4 Test flow mold, (a) picture of the mold and (b) dimensions in the mold

射出成形機は、スクリュの回転動作により樹脂を溶融混練し、計量された樹脂をスクリュの前進動作によりノズルから金型内に射出する。このスクリュの前進動作は、スクリュと連結されている射出シリンダー内のピストンにて行われ、そして、この射出力は電動機の回転軸に連結されている可変吐出ポンプより吐出された作動油の圧力によって作り出される。テストフロー金型を用いた成形では、金型内の急激な負荷変動圧力 P_1 が発生し、この圧力は溶融樹脂、スクリュ、ピストンを介して射出シリンダー室内の作動油に伝わり、最終的に可変吐出ポンプまで達する。そこで、本実験では、金型内の負荷変動圧力 P_1 を射出シリンダー油圧力 P_2 (Pressure Sensor 1) の計測によって求めた。また、同時にスクリュ前進速度(射出速度)、電動機の回転速度、そして、可変吐出ポンプの斜板傾き量を計測した。

3. 実験結果と考察

3.1 予備実験結果

予備実験として、薄肉部 0.25 mm の平板成形を行っ

Table 3 Experimental parameters and resins used at the test flow molding and the plate molding

1. Molding parameters (test flow)	Injection set value Velocity : 99% (120 mm/s) Pressure : 99% (13.7 MPa) Stroke : 20 mm Temperature set value Nozzle : 200°C Front : 200°C Middle : 200°C Rear : 190°C Mold : 50°C Hyd. : 40°C
2. Resin (test flow)	Type : General purpose polystyrene (Denka styrol) Grade : MW-1-301
3. Molding parameters (plate)	Injection set value Velocity : 99% (120 mm/s) Prssure : 99% (13.7 MPa) Hold pressure : 30% (4.1 MPa) Stroke : 30 mm Decomp. stroke : 2 mm Temperature set value Nozzle : 210°C Front : 220°C Middle : 220°C Rear : 210°C Mold : 50°C Hyd. : 40°C
4. Resin (plate)	Type : ABS (Denka styrol) Grade : GT-R-40

たときの、射出シリンダー油圧力と射出速度の挙動を Fig.5 に示す。スクリュが動きだし、遅れてシリンダー油圧力が立ち始めている。圧力が遅れているのは、可塑化計量後にノズルからの樹脂漏れを防止するために、スクリュの強制後退動作を行っていることに起因している。その後 0.2 s 手前までは、ゆるやかな負荷圧力の増加に対して射出速度は一定を保っているが、負荷圧力が 8 MPa を越えると射出速度が低下し、さらに 12 MPa を越えると急激に減少する。この射出速度の挙動が射出率の低下を起こす。負荷圧力の上昇に伴い射出速度の減少を起こす射出成形機の要因としては、(1) 可変吐出ポンプ駆動用電動機の回転速度の減少、(2) 可変吐出ポンプの吐出流量の減少、(3) 作動油の圧縮特性の影響等が考えられる。そこで、以下の実験では三つの要素に着目して検討を行う。

ここで、射出速度の増速要因と考えられるスクリュ逆止弁の閉鎖過程での樹脂漏れ量の定量的な評価については、小林¹⁰⁾ らが行っており、理論的射出量の 15 % 程度が逆流すると報告されている。本実験で使用した

Fig.5 Time histories of injection velocity and pressure

スクリュを含む射出装置の仕様は、小林らが使った装置と同じなので、同程度の逆流はあると考えられる。しかし、スクリュ逆止弁の開閉動作による射出速度への影響については、大矢¹¹⁾の報告によれば影響がないことが示されている。そこで、本研究では、スクリュ逆止弁からの樹脂漏れの影響による射出速度の増速効果の影響については考慮しない。また、溶融樹脂の圧縮特性による増速の影響については、実験結果より考察する。

3.2 可変吐出ポンプ駆動用電動機の影響

負荷圧力の増加に伴う電動機のスリップによる回転速度の低下が、射出速度にどの程度影響を与えるかを実験的に明らかにする。回転速度の計測はパルスセンサー1を用い、パルスをカウントして行った(Fig.1参照)。

テストフロー金型を用いた成形時における負荷圧力、射出速度およびここで着目している電動機回転速度の時間変化の測定結果をFig.6に示す。スクリュが前進を開始すると射出速度は120 mm/sまで加速し、溶融樹脂はノズルから金型内へ射出される。スプルーそして円盤部分への充填が行われ薄肉部への充填が開始されると、樹脂流路が極端に狭くなることで負荷圧力(P_2)が急激に上昇を始める。それと同時に射出速度の減速が起き、この点が図中のAである。A点を過ぎ薄肉部への充填を開始した溶融樹脂は、金型壁面への熱移動により急速に冷却され粘度が上昇し、流動抵抗すなわち負荷圧力がさらに増加する。可変吐出ポンプは負荷圧力の上昇により圧力設定値に近づくと、流量制御から圧力制御に移行し、圧力設定値である13.7 MPaで制御される。この制御の移行開始点がBとなる。C点は負荷圧力と圧力設定値の交差する点である。樹脂の流動は薄肉部での急冷により冷却固化されて停止する。しかし、ゲートシールが完全に終了するまで

は、わずかながら樹脂の移動は起きている。ゲートシール終了後、スクリュはその前側に滞留している溶融樹脂を圧縮しながらゆっくりと前進を続けて最後には停止する。

以上の射出速度と負荷圧力の挙動において、電動機の回転速度は射出速度の立ち上がりと同時に減速を始めるが、A点に達するまでは1740 rpm付近でいったん安定する。A点を過ぎ負荷圧力の上昇が開始すると再び減速を始め、B点通過直後まで減速を続ける。そしてC点を過ぎると回転速度は増加し、射出速度が0になった状態でほぼ射出スタート時のスリップしていない回転速度に戻る。ここで、電動機のスリップによる射出速度への影響について定量的な評価を行う。着目している領域は、射出速度が急激な減少を示すA-B区間とする。この区間における電動機の回転速度の減少量 ΔN は33 rpmとなっている。この減少に伴う可変吐出ポンプ吐出量の減少量 ΔQ_3 は、次式により求められる。

$$\Delta Q_3 = \eta C \Delta N \times 10^{-2} \quad (1)$$

$$= 1.85 \quad (\text{l/min})$$

η : ポンプ効率 100 (%)

C : ポンプ1回転当たりの吐出量 (0.056 l/rev)

この ΔQ_3 から射出速度の減速量 ΔIV は、次のように求められる。

$$\Delta IV = \frac{\Delta Q_3}{A}$$

$$= \frac{1.85 \times 10^6}{60} \times \frac{1}{133 \times 10^{-4} \times 10^6} \quad (2)$$

$$= 2.32 \quad (\text{mm/s})$$

A: 射出シリンダー面積 ($133 \times 10^{-4} \text{ m}^2$)

この結果、電動機のスリップによる射出速度の減速量は2.32 mm/sとなる。一方、Fig.6において、A-B区間での射出成形時における射出速度の減少量は40 mm/sとなっている。そこで、両者の比較から、電動機のスリップによる射出速度の減少の影響は、全体の6%程度と見積もることができる。ここで、ポンプ効率を100%と仮定したことから、実際の寄与は6%以下と考えられる。

3.3 可変吐出ポンプの影響

最初に可変吐出ポンプ系の特性を調べるため、系を独立させ、負荷に圧力制御弁(Relief valve)を使用し、圧力制御弁の制御圧力を変化させることで、負荷圧力に対する吐出流量と斜板の傾き量の変化を測定した(Fig.7)。ここで流量制御設定値を一定にし、圧力制御設定値を6.3 MPaと8.3 MPaの2通りとした。流量 Q_3 は油圧モーターの回転数(Pulse Sensor 2)に

Fig. 6 Time histories of injection velocity, pressure, motor speed and swash plate angle

Fig. 7 Variations of flow rate and swash plate angle with pressure on different set values to be pressure control

より、圧力 P_3 は Pressure Sensor 2 により、斜板の傾き量は Potentio Sensor により測定した。

吐出流量の挙動から、一定の流量が制御されている領域 (Flow Control) と、徐々に減少する領域 (Override) と、ほとんど 0 になっている領域 (Pressure Control) に区分できる。それぞれの境界を Cut off point および Full cut off point と呼ぶ。ここで Full cut off point は圧力設定値と一致する点である。この結果より Cut off point に達するまでは、流量制御が行われており吐出流量は一定であることがわかる。また、Cut off point は斜板の傾き量が減少を開始するポイントと同時であり、斜板の挙動から流量制御のポイントが判断できる。さらに、流量制御域で圧力が上昇したときに流量を補償するために、斜板の傾き量が右上がりの挙動を示しているが、これは可変吐出ポンプがフィードバック制御されていることによる結果である。これらの挙動結果が以後の実験結果と関連してくる。

次に、負荷圧力を急激に変化させたときの結果を Fig. 8 に示す。電動機の回転速度も同時に計測をした。吐出流量が 53 l/min で流量制御をしているときに、負荷圧力を 2.1 MPa から 14.2 MPa まで変化させた結果、流量が 15 l/min 減少するが、その後元の流量に戻っている。また、負荷圧力を変化させたときの電動機回転速度の減少は 11 rpm で減少量は 0.6 l/min となる。斜板の傾き量はフィードバック制御により変化をしている。この結果より可変吐出ポンプは、流量制御中に急激な負荷変動が発生してもいったん流量は減少をするが、元の吐出流量に復帰することがわかった。ここで、パルス的に減少する挙動については 3.4 項の作動油の影響で解析を行う。

次に、この特性をもつ可変吐出ポンプを搭載した射出成形機で、テストフロー金型を使用しての実験結果が前節の Fig. 6 である。設定圧力、可変吐出ポンプの

斜板の傾き量の挙動より、射出スタートから B 点までは流量制御域であり、この B 点が Cut off point となる。このことは、可変吐出ポンプの特性試験結果 (Fig. 7) で、斜板の傾き量が減少を開始するポイントまでが流量制御領域であったことから判断ができる。ここで、可変吐出ポンプの流量制御域 (スタート-B 間) において、A 点からの負荷圧力の急激な上昇で射出速度は減速を開始しているが、Fig. 8 の実験結果より、流量制御域であれば負荷圧力の急激な上昇があっても、吐出流量は制御されていると考えてよい。したがって、Fig. 6 の A-B 間においても同じと考えられ、すなわち、B 点の直後に射出速度が増加していることは、可変吐出ポンプは流量制御状態で、流量設定値の吐出流量を吐出していた結果と考えられる。以上より、可変吐出ポンプは射出速度の減速に影響を与えていなかったと言える。

3.4 作動油の影響

作動油は一般的には非圧縮流体とみなされ圧縮量は非常に少ないが、動特性および高圧化においてはその量が問題になってくる^{12),13)}。

実際には、作動油を圧縮流体として考え成形機を設計しているが、静特性によるデータを参考にしてることが多い。そこで、本研究では作動油の圧縮特性を測定し、射出速度への影響を検討する。

最初に、本研究で使用している作動油の体積弾性係数 k を求めた。測定方法は、射出シリンダーの圧力を目標値まで上昇させた後、射出シリンダーに取り付けであるバルブを開いて、圧力が 0 になるまで吐出された作動油量をメスシリンダーで計量した。計量した吐出量が、設定した圧力 (ΔP) での圧縮量 (ΔV) となる。作動油温度を $40 \pm 1^\circ\text{C}$ に保って圧力 (ΔP) と圧縮量 (ΔV) を測定した結果を Fig. 9 に示す。ほぼ直線関係にあり、実測値を次式に代入して k を求めた。

Fig.8 Transient variations of pressure, swash plate angle, flow and motor speed

Fig.9 Compressibility of oil hydraulic fluid used in the experiment

$$\Delta V = \frac{1}{k} V \Delta P \quad (3)$$

ただし、射出シリンダー容積 V は 1.66 l とした。この結果、本実験で使用している作動油の体積弾性係数 k は、 $(0.85 \pm 0.03) \times 10^3 \text{ MPa}$ となった。

前々節で得られたテスロフロー金型による射出特性の結果 (Fig.6) から、作動油の影響について検討を行う。A 点から B 点までの射出速度の減速量は 40 mm/s であり、これを射出シリンダー面積 ($133 \times 10^{-4} \text{ m}^2$) より流量に換算すると 31.9 l/min となる。

次に Fig.6 の A-B 区間の圧力変化 ($\Delta P = 6.6 \text{ MPa}$) から (3) 式を用いて圧縮量を計算すると、 $\Delta V = 22.4 \times 10^{-3} \text{ l}$ が得られる。ただし、ここで用いた容積 V は、射出シリンダーの他に射出時に圧力が加わる配管およびマニホールドの容積を加算した値 2.88 l を用いた。A-B 区間の時間 50 ms と圧縮量から、流量に換算すると 26.9 l/min が得られる。すなわち、この値はスクリュの前進に寄与しないで、作動油の圧縮に消費される流量となる。射出速度の減速量から求めた流量 31.9 l/min と比較すると、作動油の圧縮に消費されている流量は 84% となる。このことは逆に、射出速度の減速の原因の 84% は作動油の圧縮によるものであると言える。すなわち射出時において、本来流量制御域にあって一定の射出速度を保つはずが、負荷圧力の急上昇により実射出速度が低下し未充填になる主な要因は、作動油の圧縮の影響であることが本実験から明らかになった。

ここで、溶融樹脂の圧縮特性による増速要因については次のように考察をする。作動油の圧縮量としては $22.4 \times 10^{-3} \text{ l}$ が得られたので、溶融樹脂の圧縮量 ΔV を求める。圧縮に影響を与える容積 V は、スクリュ径 (36 mm) より計算した面積 $10.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ と計量ストローク距離 (20 mm) より $20.4 \times 10^{-3} \text{ l}$ となる。また、体積弾性係数 k は、射出時のスクリュ最前進位置

と射出終了後に樹脂の圧縮特性で押し戻されたスクリュの移動距離と、そのときの圧力差より $(0.25 \pm 0.02) \times 10^3 \text{ MPa}$ となった。したがって、溶融樹脂の圧縮量 ΔV は (3) 式より、 $7 \times 10^{-3} \text{ l}$ となる。ここで、 ΔP は A-B 区間の油圧力変化量 6.6 MPa から樹脂圧力差に換算した 85.7 MPa を用いた。この結果より、射出速度の減速に影響を与える作動油の圧縮量 $22.4 \times 10^{-3} \text{ l}$ は、増速に影響を与える溶融樹脂の圧縮量 $7 \times 10^{-3} \text{ l}$ の 3.2 倍であり、減速要因のほうが大きいことがわかった。

次に、前節で行った可変吐出ポンプの単体実験 (Fig.8) において、可変吐出ポンプが流量制御中に負荷圧力の変化により、吐出流量がパルス的に減少した挙動は、作動油の圧縮の影響であったことを説明する。実験システムでの配管は、直径 19 mm で長さ 1 m のゴムホース (仕様を Table 1 に示す) が 2 本と直径 17 mm で長さ 0.7 m の配管で構成されており、容積 V は 0.726 l となる。ここで、容積 V にはゴムホースの圧力変化による体積変化量 ($4.8 \times 10^{-3} \text{ l}$) を、容積 V の 1% 未満であることから加算をしなかった。 ΔP は 6.8 MPa であり、実験で求めた体積弾性係数 k より、 ΔV は $5.8 \times 10^{-3} \text{ l}$ で、吐出流量が減少し増加を始めるまでの時間は 25 ms であるから、流量に換算すると 14 l/min となる。前節での流量の減少量は 15 l/min であり、これから電動機による減少量 0.6 l/min を引くと 14.4 l/min となり、圧縮で消費された流量とほぼ一致する。したがって、Fig.8 の吐出流量の減少は作動油の圧縮が原因であったと言える。

3.5 検証実験

以上の実験結果より作動油の圧縮特性が、射出速度の減速に大きく影響を与えていることがわかった。そこで、作動油の圧縮に消費した吐出流量 (26.9 l/min) を負荷圧力が急激に増加を始める前に補足してやることで、射出速度の減速と成形品の形状がどのように改

善されるか検証実験を行った。射出速度の比較結果を Fig.10 に、成形品形状の比較結果を Fig.11 に示す。射出速度は、負荷圧力が急激に増加を開始しても減速現象が発生せず、また、成形品においては薄肉部での樹脂の流動長が伸びていることがわかった。ここで、流量を補足したときに射出速度が減速をせずに射出した、いわゆる増加分の樹脂量と成形品の体積の増加分を比較した結果、増加した射出樹脂量の約 60 % が成形品の体積増加となった。この結果より、約 40 % は溶融樹脂の圧縮特性、スクリュ逆止弁からの漏れ量等の影響と考えられる。この検証実験では、射出成形機側での射出速度の減速原因、すなわち作動油の圧縮量を考慮¹⁴⁾してやることにより、薄肉成形品への樹脂充填量の大幅な改善が可能になったことがわかったが、一方では、溶融樹脂の圧縮特性等の影響も薄肉成形では考慮する必要があることもわかった。現在、樹脂の圧縮特性を含めた定量的な評価については、検討を行っており、次の論文で報告を行う予定である。

4. 結 言

本研究では、樹脂充填中における急激な負荷圧力の増加に伴う射出速度の減速の要因として、油圧制御系の 3 要素（電動機回転速度の減速、可変吐出ポンプの吐出流量の減少および作動油の圧縮）に着目して検討を行った。その結果、上記 3 要素のみを減速要因と仮定した場合、電動機回転速度の減速の影響が 1 割弱、可変吐出ポンプの吐出流量の影響は無し、さらに、作動油の圧縮の影響が 8 割強の割合で寄与していることとなった。さらに、作動油の圧縮により消費された作動油量を補足した検証実験から、成形品の薄肉部に充填される樹脂量が大幅に改善されることも確認できた。作動油の圧縮特性が予想以上に射出速度の減速特性に大きな影響を及ぼすとともに、薄肉成形加工品にも影

Fig.11 Comparison of the molding improved (lower) with normal one (upper)

響をしていることが明らかになった。

射出成形において、射出速度と圧力の制御は重要な要素であり、その中で速度制御は成形品の充填工程すなわち成形品形状を決定する役目をもっている。成形品の薄肉化が一層進む中で、大きなパワーが要求され、油圧駆動の成形機はより重要性が増してきている。そこで、本研究において明らかになった作動油の圧縮特性を理解した上での、成形機の制御設計が必要となる。具体的には、射出速度制御時に負荷圧力の急激な増加で発生する作動油の圧縮量を考慮にいった制御システムや、作動油の圧縮量に影響を与える可変吐出ポンプから射出シリンダーまでの配管を含めた容積の縮小化等が検討されなければならない。さらに、成形機の動特性を理解した成形加工の条件設定、例えば、急激な負荷変動を発生させない金型構造やゲート位置、さらには金型薄肉部での金型温度コントロールの設定温度の高温化と、可能な範囲内での溶融樹脂温度の高温化による樹脂流動性の促進等の検討がさらに必要となってくる。そして、本研究結果より成形加工、特に薄肉成形においては、射出成形機、樹脂、金型等の特性を含めた総合的な評価実験が必要とされていることである。

謝 辞

本研究に関し、ご助言をいただいた油研工業㈱と日精樹脂工業㈱の中村伸之氏、甲田紀泰氏、山極佳年氏に感謝するとともに、研究遂行に当たり、色々のご配慮いただいた日精樹脂工業㈱の高山和利氏に厚くお礼を申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 坂西英男：射出成形（伊藤 忠、曾根忠利、中川 曠編集）、232（1993）、プラスチックスエージ
- 2) 滝沢道明：プラスチック成形技術、10（2）、

Fig.10 Comparison of time history of improved injection velocity and pressure with normal ones

- 87 (1993)
- 3) 菅沼雅資, 斎藤保典, 野村彰夫: プラスチック成形加工学会講演会集 (成形加工'96), 405 (1996)
 - 4) 宇高 靖: プラスチック成形加工学会講演会集 (成形加工'93), 33 (1993)
 - 5) 村田泰彦, 岡 克典, 出口好希, 横井秀俊: プラスチック成形加工学会講演会集 (成形加工'91), 15 (1991)
 - 6) Jong-Hwei Wei, Chian-Chiunn Chang and Cheng-Ping Chiu: *Polymer Engineering and Science*, **34** (11), 881 (1994)
 - 7) 田中和博, 桜井康雄, 高橋浩爾, 幸田武久: 油空圧講演会論文集, No. Autumn, 45 (1988)
 - 8) 塩入隆仁, 山沢清人: 成形加工, **8** (3), 189 (1996)
 - 9) 橋本登志雄, 服部志郎: パワーデザイン, **26** (6), 53 (1988)
 - 10) 小林和豊, 滝澤清登: プラスチック成形加工学会講演会集 (成形加工'97), 179 (1997)
 - 11) 大矢 博: プラスチック成形加工学会講演会集 (成形加工'94), 231 (1994)
 - 12) ダイキン工業油機技術グループ: 疑問にこたえる機械の油圧 (上), 310 (1987), 技術評論社
 - 13) 新井澄夫: 油圧作動油, 74 (1980), 日刊工業新聞社
 - 14) 中村伸之, 菅沼雅資: 特許 2628266 号
-