超音波の射出成形への応用 (その2)

—転写性の検討—

佐 藤 淳*・片 桐 邦 俊*

Application of Ultrasonic Vibration to Injection Molding (Part 2)

—Experimental Study on the Improvement of Transcription of Minute Shape—

Sato, Atsushi*/Katagiri, Kunitoshi*

We have developed the Ultrasonic Injection Molding (UIM) system as a precision injection molding technology, in which the ultrasonic vibration has been applied to injection molding. In general, a certain shape in minute scale is often transcribed on the surface of products in order to invest the polymer products with an optical function. In consideration of these applications, effectiveness of the UIM system for improving the degree of transcription of a minute shape (triangular pyramid of 70 μm in height) was experimentally investigated in this paper under various mold temperature conditions. The results showed that the degree of transcription of the minute shape is improved markedly by the UIM system in comparison with the conventional molding at the same mold temperature, and that the mold temperature in UIM could be reduced about 20 K in order to obtain the same transcription as in the conventional molding. The mechanism of the improvement of transcription in UIM could be attributed to the inertia force acting on the polymer melt due to ultrasonic vibration during the melt filling process. Namely, the inertia force due to ultrasonic vibration would stuff the resin into the minute part of mold surface. Furthermore the local heating of resin due to absorption of the ultrasonic vibration was considered to be another mechanism of the transcription improvement during the packing-holding process. Heating due to absorption of ultrasonic vibration, which is evident especially in the region between molten- and solidified-layers would result in reduction of deformation resistance of the solidified layer, and thus the transcription due to packing-holding pressure would be helped by the UIM.

Key words : Injection Molding/Ultrasonic Vibration/Transcription/Inertia Force/Local Heating

1. 緒 言

光学製品分野等の精密射出製品では、高機能化・高性能化、高精度化等が進められている。例えば、導光板やレンズでは、機能性をもたせるための製品表面の微細形状化や、また DVD 等の光情報記録盤では、高記録密度化にともなう記録溝の狭ピッチ化が進められており、製品表面に微細形状を精度良く転写させる技術が必要となってきた。

そこで、このような高機能化・高性能化のニーズに対応するために、われわれは、新しい技術として射出成形へ超音波振動を適用できる装置を開発してきた。前報¹⁾では、

射出成形へ超音波振動を適用した結果として、樹脂の流動性が向上して成形時の流動配向が緩和すること、また、冷却時の熱応力も低減して結果的に成形品の光学異方性が低減することを報告した。

本報では、射出成形へ超音波振動を適用した場合の転写性の評価を行った結果について報告する。

2. 実 験

2.1 超音波射出成形装置^{1)~3)}

超音波射出成形 (Ultrasonic Injection Molding : 以下 UIM と略す) 装置の概略図を図 1 に示す。本装置は、超音波振動子から発生した超音波振動を振動方向変換体を介して可動側および固定側金型へ伝播させ、金型全体を共振させながら成形を行う装置である (本装置の特徴については前報¹⁾参照)。

成形機は、型締力 80 tonf の射出成形機 (東芝機械(株)製 IS 80 EPN-2 Y) を用い、超音波発振機は、中心周波数 19

* 出光石油化学(株) 応用研究所 技術開発室
市原市姉崎海岸 1-1 (〒299-0193)
Processing Technology Section, Polymer Applications
Development Laboratory, Idemitsu Petrochemical Co., Ltd.
1-1, Anezakikaigan, Ichihara-shi, Chiba, 299-0193, Japan
1999. 12. 17 受理

Characteristics of UIM machine

Characteristic 1: The mold is designed to resonate at n wavelengths for 19KHz.

Characteristic 2: The cavity is located the loop portion in resonance for the use of the maximum energy by ultrasonic vibration to the molding materials.

Characteristic 3: The part of the mold fixation and the contact with nozzle of injection unit are located the node portion in resonance to prevent the outflow of ultrasonic vibration.

Fig.1 Schematic representation and characteristics of UIM system

Fig.2 Model of mold in UIM

Fig.3 Vibration state of parting surface

kHz, 出力 1,200 W (精電舎電子工業(株)製 SONOPET 1200 B: UIM 専用機) のものを用いた。

2.2 UIM 用縦振動共振金型

共振金型 (材質: ジュラルミン 7075 を使用) は, 金型全体を一波长縦振動共振体として有限要素法解析を利用して設計した¹⁾。

また, 実際の成形中のパーティング面 (キャビティ面) の振動状態を把握するため, 振動解析^{4), 5)}を行っている。振動解析の手順は, 図 1 の金型を図 2 に示すようにモデル化し, 図 2 の駆動面にインパルス入力を行い, キャビティ面の振幅波形を高速フーリエ変換して金型の共振周波数を得る。得られた共振周波数の振動を金型へ入力してキャビティ面の振動状態を解析する。振動解析の有効性を判断するために, 本検討で用いた可動側金型のパーティング面の振動状態を, レーザードップラー振動計で測定した実測値と振動解析値とを比較した結果を図 3 に示す。その結果,

実測値と解析値はほぼ一致しており, 振動解析が有効であることがわかる。そして, 実際に金型が型締した状態でのパーティング面の振動状態を解析した結果を図 4 に示す。その結果, 実際の成形時では, パーティング面が図 4 のように振動していると予測できる。

また, 本検討で用いた成形品形状とキャビティ部の微細形状を図 5 に示す。

2.3 転写性の評価法

転写性は, 成形品へ転写された微細形状の高さ (h) とキャビティの微細形状の溝深さ ($H: 70 \mu\text{m}$) との比率である転写率 $Tr (= (h/H) \times 100 (\%))$ の大きさを評価した。微細形状の高さは, 走査型レーザー顕微鏡 (オリンパス光学工業(株)製) で測定した。

3. 結果および考察

3.1 転写率に対する超音波の効果

成形材料にポリカーボネート (タフロン MD 1500: 以

Fig. 4 Vibration state of parting surface by vibration analysis

Fig. 5 Configuration of molding product and minute shape on product surface

下PCと略す)を用いて、成形温度 320℃ で金型温度を変化させて通常成形と UIM (設定振幅 5 μm: 0 - P で印加時間は射出開始から 5 秒間)での転写率を測定した結果を図 6 に示す。その結果、UIM では、通常成形と比較して転写率が向上した。なお、金型温度 100℃ の UIM では、収縮率を考慮すると 100% 転写となる。

したがって、本実験条件下における UIM では、通常成形より金型温度が約 20℃ 低くできるため、成形サイクルを向上できる可能性があることがわかる。

3.2 金型の振動位相と転写率の関係

可動側および固定側金型の振動の位相を変化させた場合の転写率に対する超音波の効果を検討した。

通常、可動側および固定側金型は、同位相で振動させている。そこで、キャビティ部を図 7 に示すような入れ子構造として、振動解析により周波数を変化させて入れ子同士の位相が 180° ずれる周波数を見出し、その周波数で振動させながら成形 (金型温度: 110℃) した成形品、同位相で成形した成形品および通常成形品の転写率を測定した結果を表 1 に示す。その結果、位相をずらした場合には、通常成形と比較して転写率が向上しなかった。

したがって、転写に対する超音波の効果は、金型を同位相で振動させた場合 (表 1 参照) に発現することがわかる。

3.3 超音波の印加開始時期と転写率の関係

超音波が成形時のどの過程で主に作用しているかを把握するために、超音波の印加のタイミングを変化 (射出開始からある時間後に超音波を 5 秒間印加) させた場合の転写率を測定した (金型温度: 100℃) 結果を図 8 に示す。そ

Fig. 6 Relationship between degree of transcription and mold temperature

Fig. 7 Cross section of mold in UIM

Table 1 Results of degree of transcription in UIM

	Phase of insert block		
	Same	Shift 180°	—
Frequency (kHz)	19.8	20.3	—
Degree of transcription (%)	97	87	85

の結果、樹脂の充填中に超音波の印加を開始した場合に転写率は大きく向上し、また充填完了後 5 秒以内に超音波の印加を開始した場合でもある程度転写率が向上した。

したがって、超音波は、樹脂の充填過程で主に作用していることがわかる。

3.4 充填過程の樹脂に対する超音波の作用

樹脂の充填過程における転写率の向上要因を特定するため、充填過程にある樹脂が振動している金型内でどのような作用を受けているかについての検討を行った。

まず、超音波の局所加熱作用により、金型壁面近傍での

Fig. 8 Relationship between degree of transcription and action timing of ultrasonic waves

Fig. 9 Model of spring-particle system

溶融樹脂の粘度が低下して転写率が向上することが考えられるが、3.2の結果から、超音波振動を付与しながら成形しても効果が発現しない場合があり、別の超音波の作用が働いているものと考えられる。

3.2の結果から、金型を同位相で振動させた場合に超音波の効果が発現したことから、キャビティ内を流動している樹脂が受ける作用は、バネ-質点系の運動方程式から考察できるものと考えられる。

キャビティ内の樹脂はキャビティの相対する2面の振動によって加振されているため、模式的に図9のように表すことができる。この時の質点の運動方程式は次式のようになる。

$$k(u_1 - u) + k(u_2 - u) - m\ddot{u} = 0 \quad (1)$$

すなわち、

$$m\ddot{u} + 2ku = k(u_1 + u_2) \quad (2)$$

ここで、 k はバネ定数、 u_1 と u_2 は超音波振動印加によるキャビティ面の変位であり、 u は質点の変位、 $\ddot{u}$ は加速度、 m は質量である。 u_1 と u_2 は、調和振動であり、キャビティの相対する2面の振動位相が逆位相の場合には(2)式の右辺はキャンセルしあって0となり、質点、すなわちキャビティ内の樹脂は振動しない。一方、キャビティの相対する2面の振動位相が同位相の場合には、キャビティ内の樹脂は振動する。したがって、3.2の結果から、キャビティ内の樹脂が振動する場合に転写性が向上することになる。そして、振動している樹脂が受ける力は、(1)式の第3項

Fig. 10 Conceptual diagram of action of inertia force by ultrasonic vibrations

Fig. 11 Dependence of degree of transcription on amplitude of vibrations

$(-m\ddot{u})$ の慣性力である。正弦的な時間変化を仮定すると、複素領域において u は次式で示される。

$$u = Ce^{j\omega t} \quad j^2 = -1 \quad (3)$$

ここで、 ω ($=2\pi f$: f は周波数) は角周波数、 C は変位 u の振幅である。したがって、慣性力 $-m\ddot{u}$ は次式で示される。

$$-m\ddot{u} = m\omega^2 u \quad (4)$$

この慣性力が実際成形中に作用していると仮定した場合の模式図を図10に示す。微細形状部の流動末端の樹脂は変位方向と反対の向きに慣性力による反作用力を受ける。転写性向上の要因が慣性力であると仮定すれば、周波数を一定とした場合に転写率 Tr は次の関係で表される。

$$Tr \propto u \propto C \quad (5)$$

そこで、超音波の振幅を変化させた場合の転写率を測定した結果を図11に示す。その結果、転写率と振幅とは比例関係にあり、(5)式が成立していることがわかる。

したがって、充填過程にある樹脂は、超音波振動による慣性力を受けながら微細形状の細部まで押込まれ、結果的に転写率が向上することが考えられる。

以上の仮説のもとに、UIMでのキャビティ内圧挙動を測定した結果を図12に示す。その結果、UIMでは、一次圧の立ち上がり(傾き)は通常成形より若干速く、通常成形で一次圧が最大となった以降も圧力変動を伴い最大圧力

Fig. 12 Pressure behavior in a cavity

Fig. 13 Schematic explanation of the P - v - T measurement set-up for the melted resin subjected to ultrasonic vibrations

を維持し続けた。そして、UIMでは、通常成形より一次圧のピーク面積が本実験条件下では30%以上大きくなった。したがって、UIMの場合、樹脂は通常成形より多くの圧力履歴を受けていることがわかる。

また、UIMの一次圧の最大付近は圧力変動を伴っているが、これは以下の理由によるものと考えられる。図1に示すキャビティは1秒間に19,000回左右に移動しており、圧力センサーのサンプリング時間(0.1 sec)を考慮すると、左右に移動した時の圧力波形が数点観測されているものと考えられる。すなわち、キャビティ内の熔融樹脂が圧力センサー側に移動した場合には、樹脂は慣性力により圧力センサーと反対方向に反作用力を受け、結果的に圧力が低下して波形の谷の位置となる。また、熔融樹脂が圧力センサーの反対側に移動した場合には、樹脂は慣性力により圧力センサー側に反作用力を受け、結果的に圧力が増大して波形の山の位置となる。

以上の結果から、超音波振動による慣性力が観測されたものと考えられる。また、UIMで一次圧のキャビティ内圧が通常成形より大きくなる理由は、前報¹⁾で報告したように、スプルー部で発生する音圧によるものと考えられる。すなわち、この音圧が樹脂を流動方向へ押す力となり、結果的にキャビティ内圧が増大するものと考えられる。

図12中のUIMでは、射出時の圧力ピーク後に、再び圧力が増大しているが、この理由については3.5で後述する。

以上まとめると、樹脂充填過程では、超音波振動の慣性

Fig. 14 Dependence of specific volume on temperature with vibration

力と音圧により転写率が向上するものと考えられる。

3.5 保圧過程の樹脂に対する超音波の作用

UIMにおいて保圧過程で転写率が向上することは、図12のキャビティ内圧挙動から、容易に類推できる。

微細形状の転写のメカニズムに関して、保圧力による樹脂のクリープ変形により転写は促進されるという報告⁶⁾がある。すなわち、転写の要因として、負荷圧力、圧力負荷時間、樹脂物性に起因する変形抵抗、固化層厚みに起因する変形抵抗を上げている。本検討では成形条件を一定にしているため、圧力負荷時間、樹脂物性に起因する変形抵抗は一定であり、負荷圧力についても成形時の一次圧、二次圧は一定である。したがって、UIMでは、負荷圧力(成形時の一次圧、二次圧以外の負荷圧力)、固化層厚みに起因する変形抵抗の要因が関与しているものと考えられる。

そこで、樹脂の固化過程での超音波の作用についての検討を行った。図13に示す装置でPCを用いて、超音波振動下における P - v - T 測定(榊東洋精機製作所製PVT TEST SYSTEMで測定)を行った結果を図14に示す。 P - v - T 測定は、圧力を10 MPa一定として200°Cから10°C毎に下げて行き、各温度で一定温度となった後の樹脂の比容積を測定した。また、超音波振動下における P - v - T 測定は、各温度で一定温度となった後に超音波を5秒間印加し、停止後60秒後の樹脂の比容積を測定した。図14の超音波振動下のデータは、超音波印加前の樹脂温度に対して超音波印加後の樹脂の比容積をプロットしたものである。その結果、PCのガラス転移温度(T_g)以上では、超音波振動の有無で差はなく、 T_g 以下で超音波振動を与えた場合に、比容積の減少率が緩やかになった。すなわち、超音波振動下では、超音波の局所加熱作用により樹脂が内部発熱を起こして、体積膨張しているものと考えられる。

したがって、固化過程で超音波振動を印加した場合には、成形品の内部で超音波エネルギーが熱に変換されていることが考えられる。超音波が成形品の内部を伝播した場合には、密度差が生じている部分で音波が吸収され熱に変換される(境界面摩擦)。固化過程で、成形品内部に密度差が生じるのは固化層と熔融層の界面であり、この部分で発熱を起こしているものと考えられる(図15参照)。

Fig.15 Conceptual diagram of improvement of transcription during packing-holding process

また、図12中のUIMで保圧時にキャビティ内圧が増大するのは、成形品内部の発熱により体積が膨張するためと考えられる。

したがって、UIMでは、成形品の固化層の成長が遅れる結果、固化層厚みに起因する変形抵抗が低減して保圧が効率良く働いて、転写率が向上するものと考えられる。

以上まとめると、保圧過程では、超音波の局所加熱作用が働いて、転写率が向上するものと考えられる。

4. 結 言

射出成形へ超音波振動を適用し、転写性の評価を行った結果、次のような結論を得た。

- (1) 樹脂の充填過程では、超音波振動による慣性力と音圧により、キャビティ内圧が増大して微細形状の細部まで樹脂が押込まれるために転写性が向上するものと考えられる。
- (2) 保圧過程では、超音波の局所加熱により固化層の形成を遅らせ、保圧が効率的に働いたために転写性が向上するものと考えられる。

謝 辞

本検討を行うにあたり、 P - v - T 測定でご指導を頂いた山形大学小山清人教授に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 佐藤 淳, 阿部知和: 成形加工, **10**(6), 445 (1998)
- 2) 佐藤 淳, 山村三喜男, 山本 強: 成形加工 '97, 185 (1997)
- 3) 特許登録 1881947 号 (特願平 1-62196)
- 4) 片桐邦俊, 佐藤 淳: 成形加工 '99, 149 (1999)
- 5) 佐藤 淳, 成形加工: **11**(10), 810 (1999)
- 6) Yoshii, M., Kuramoto, H. and Kato, K.: *Polym. Eng. Sci.*, **34**(15), 1211 (1994)