キャビティ面圧分布計測への触覚センサの応用

村田 泰彦^{*1}・横井 秀俊^{*1}・河崎 浩志^{*2}

Application of Tactile Sensor to the Measurement of Melt Pressure Distributions along Cavity Surface

Yasuhiko MURATA^{*1}, Hidetoshi YOKOI^{*1}, Hiroshi KAWASAKI^{*2}

In order to clarify undesirable phenomena in an injection molding such as residual stress or sink mark, it is very important to measure the melt pressure distribution in the injection mold cavity.

In this paper, we have proposed a new method for measuring the melt pressure distribution by using a mold with a pressure transmission pin array and a tactile sensor. The results obtained through the new measurement method are summarized below.

- (1) After experimentally examining the output of the tactile sensor. We confirmed that the deflection of each sensing point is not more than 6%, and it is necessary to keep the temperature around the sensor under 35°C to increase the pressure measurement range.
- (2) We proposed an effective calibration method using a quartz pressure sensor during the injection molding process.
- (3) Based on the above measurement method, we measured the pressure distribution of low density polyethylene under various holding pressure period conditions, and the results detailed proved that this method is effective. For example, when the holding pressure period is longer than the gate sealing period, the decrease in the pressure starts around the end of the cavity. Conversely, when the holding pressure period is shorter than the gate sealing period, the decrease in the pressure starts around the gate.

Key words : Injection molding/Injection mold/Measurement/Pressure distribution/Tactile sensor

1. 緒 言

射出成形における型内樹脂圧力計測は、樹脂流動挙

動・温度計測技術と比較して汎用技術としての確立が早い。現在、汎用のひずみゲージ式^{1),2)}から、水晶圧電式圧力センサ³⁾のように 200 MPa までの高い圧力を計測できるものまでが、成形過程モニター用および研究開発用として広く実用化されている。また、最近では超音波を利用した圧力計測法の研究も進められている⁴⁾。しかし、これらはすべて、ランナー・キャビティ内 2, 3 か所に設置して行うスポット計測法にとどまっている。

現在、低圧射出成形法、ガスアシスト射出成形法などのキャビティ内における樹脂圧力分布を能動的に制

^{*1} 東京大学生産技術研究所 第2部
東京都港区六本木 7-22-1 (〒106)
Institute of Industrial Science, University of Tokyo
7-22-1 Roppongi, Minato-ku, Tokyo 106 Japan

^{*2} 凸版印刷(株) パッケージ事業本部 TPC 事業部
包装研究所
埼玉県北葛飾郡杉戸町高野台南 4-2-3
Toppan Printing Co., Ltd.
4-2-3 Takanodai-Minami, Sugito-machi,
Kitakatsushika-gun, Saitama 345 Japan
1995. 9. 26 受理

Fig. 1 Measuring method for melt pressure distribution along cavity surface

御することで成形品の品質向上を目指す新成形法が出現し、また、残留応力、およびひけ、そりなどの数値シミュレーターの開発が盛んに行われている。そのため、樹脂圧力を点ではなく、キャビティ全域における面分布として詳細に計測することの必要性がますます高まりつつある。

上記計測法がスポット計測にとどまっている原因は、(1)センサの計測部寸法が大きいために、これらをキャビティ面に細かく配列できないこと、(2)アンプを含めたセット当たりの価格が高いことにあると言える。このような現状から、著者の一部らは、既報⁵⁾において樹脂圧力分布を詳細に計測するためのすりガラスを用いた面圧分布可視化法を提案した。しかし、同手法では画像処理などのデータ解析に多くの時間を必要とし、簡便法とは言えなかった。

本論文では、簡易的に圧力分布を計測するために、圧力伝達ピンアレイと圧力分布計測用触覚センサから構成される新しいキャピティ面圧分布計測法を提案した。そして、実成形条件下での計測実験を通して、本手法の有効性の確認を行った。以下に、その概要について報告する。

Fig. 2 View of tactile sensor

2. 面圧分布計測原理および金型基本構造

2.1 計測原理

Fig. 1 はキャビティ面圧分布の計測原理を示している。多数の圧力伝達ピンが、キャビティ壁面に対して面一になるように等間隔に配列されている。圧力伝達ピンの底部Bには、多数の感圧部が格子状に配列されたシート状の圧力分布計測用触覚センサが設置されている。樹脂のフローフロントがピン上部を通過すると、それぞれのピンを介して樹脂圧力が触覚センサに伝達され、分布として検出される。

2.2 触覚センサ

本論文で使用した触覚センサは、Fig. 2 に示すニッタ製のタクトイルセンサ I-SCAN 100（以後本センサと呼称する）である。

本センサは、圧力負荷による変形量に比例して電気抵抗値が変化する導電性物質を、行電極と列電極の交点に挟み込み、各交点が圧力検出点となるように格子状に配置されたものである。本センサ出力は、パーソナルコンピュータ（日本電気製 PC-9801 RX）に記録され、グラフィック処理される。Table 1 に本センサの仕様を示す。44×44 点（縦×横）の感圧部が 2.54 mm 間隔に配されている。

本センサの圧力測定範囲は 0.8~7.0 MPa で、通常成形時のキャビティ内樹脂圧力に比べて数倍低い。そこで本論文では、Fig. 1 に示すようにピンを段付き形状とし、ピン A 部に作用する圧力を面積比 $(d_A/d_B)^2$ 倍だけ分散させて B 部に伝達するような工夫を施した。これにより、後述する圧力伝達ピン寸法から計算すると、本計測金型では、理論上 Table 1 の測定範囲の 6.25 倍までの樹脂圧力計測が可能となる。

2.3 金型基本構造

Fig. 3 は計測金型固定側の基本構造を示している。本金型は、圧力伝達ピンアレイブロックの設置された上プレートとセンサが固定された下プレートとから構

Table 1 Specifications of tactile sensor

Material of sensor film	Polyester
Sensor dimensions ($L \times W \times T$) (mm)	112×112×0.1
Number of sensing points	44×44
Pitch of each sensing points (mm)	2.54
Pressure measuring range (MPa)	0.8–7.0
Sampling rate (Hz)	50

Fig. 3 Schematic structure of the measurement mold (Stationary side)

成される面圧分布計測プレートが、固定側モールドベースに取り付けられた構造となっている。上下プレートにはそれぞれ温度配管が設けられており、プレート温度の制御が可能となっている。

Fig. 4 にキャビティ形状を示す。厚さ 2 mm の矩形キャビティ内に 25×9 本、合計 225 本の圧力伝達ピンが本センサ感圧部ピッチと同じ間隔で縦横に配されている。圧力伝達ピンの直径は、 $d_A = \phi 1.0$ mm, $d_B = \phi 2.5$ mm (Fig. 1 参照) である。本実験では、C 点の圧力伝達ピンと対向するキャビティ壁面側のエジェクタピン下に水晶圧電式圧力センサ（日本キスラー製 Type 9221）を挿入し、圧力の同時計測を行った。また、センサ周辺温度を計測するために、センサ直下の下プレートには銅-コンスタンタン熱電対（林電工製シートカップル）が貼付されている。

3. 実験方法

3.1 センサ出力特性評価実験

実成形条件下での計測実験に先立ち、本センサをキャビティ面圧分布計測に適用する場合に、事前に把握しておかなければならない基本特性の検討を行った。

本論文では、(1) 金型温度設定変更などによるセンサ周辺温度変化がセンサ出力に及ぼす影響、(2) 均

Fig. 4 Cavity shape and pressure-pins arrangement pattern (Units: mm)

Fig. 5 Experimental apparatus for examining the output of tactile sensor

等圧力負荷時における 225 点の各感圧部間の出力誤差（ばらつき）、(3) 繰り返し負荷-除荷条件下におけるセンサ出力の再現性、以上 3 項目について検討を行った。

Fig. 5 は、上記(1)(2)の検討のために製作した出力評価装置を示している。本計測金型固定側のパーティング面上に金属製の四角形のフレームを取り付け、フレームの内側にプラスチックを充填し、金属ブロックを介してその上から万能試験機（島津製作所製オートグラフ AG-10 TE）にて加圧する。これにより、225 本のピンに所定の均等圧を加えることが可能となる。なお、センサ周辺温度は、下プレートに貼付された銅-コンスタンタン熱電対（Fig. 4 参照）出力を基準として、金型温度調節器（松井製作所製 MC3-135/31 HX）により制御した。また、(3)の評価は、感圧部 1 点のみに負荷することのできる重錘式加圧治具（負荷圧力 5.8 MPa）を用いて、一定温度条件下で行った。

3.2 キャビティ面圧分布計測実験

Table 2 は型内樹脂圧力分布計測実験の成形条件を示している。実験に使用した樹脂は、低密度ポリエチレン（LDPE、三井石油化学工業製 ミラソン 68）、およびポリプロピレン（PP、三井石油化学工業製 ハイポール J 700）、汎用ポリスチレン（GPPS、住友化

Table 2 Molding conditions

Resin	LDPE	PP	GPPS
Injection rate (cm ³ /s)	9.3		
Resin temperature (°C)	180		210
Mold temperature (°C)	23		22
Holding pressure (MPa)	28.8		
Holding pressure period (s)	5.0, 9.0	7.0	8.0

学工業製エスブライト 2 V) である。本実験では、保圧時間を変化させて計測を行った。使用射出成形機は、東洋機械金属製の Ti-80 G (型締力 80 トン) である。

4. 実験結果および考察

4.1 センサ出力特性評価

a. センサ周辺温度の影響

Fig. 6 は負荷圧力と本センサ出力の関係を示してい

Fig. 6 Influence of the lower plate temperature on the relationship between pressure and tactile sensor output

Fig. 7 Relationship between tactile sensor output and lower plate temperature

る。本センサの最大出力は 255 (無次元量) で、各プロットは 225 点の感圧部出力の平均値を示している。センサ周辺温度 48°C を除いて、各温度とも圧力とセンサ出力の間にはほぼ直線関係が得られている。

Fig. 7 は、Fig. 6 をセンサ周辺温度とセンサ出力の関係に表記しなおした結果である。温度増加に伴い、センサ出力が増加している。特に 48°C では 16.7 MPa でセンサ出力が最大値に達し、測定範囲が小さく制約された結果となっている。これは、温度上昇によって導電性物質が軟化し、負荷圧力が同じでも変形量が増加するためと考えられる。しかし、35°C 以下では単位温度上昇に対するセンサ出力増加量が比較的小さくなっている。この結果は、センサ周辺温度を低く (35°C 以下) 制御することにより、広い圧力測定範囲が得られることを示唆している。

b. 各感圧部間の出力誤差

均等圧力負荷条件下における 225 点の各感圧部間の出力誤差 (ばらつき) を検討した。本論文では、Fig. 6 中に示されるすべてのプロットの条件に対して、225 点の出力の標準偏差 1 σ をそれぞれ計算し、その中の最大値を各感圧部間の出力誤差とみなした。計算の結果、上記誤差は最大 $\pm 6\%$ であることが確認された。

c. センサ出力の再現性

Fig. 8 は、重錘式加圧治具を用いて得られた 50 回の繰り返し負荷-除荷条件下におけるセンサ出力の経時変化を示している。繰り返し回数の増加に伴ってセンサ出力は増加し、30回以降において出力が安定する。これは、繰り返し動作が引き起こす発熱によって導電性物質が軟化すること、さらに軟化によって感圧部表面とビン底部との接触状態がよくなることの 2 点が原因と考えられる。30回以降におけるセンサ出力の再現性は、 $\pm 1.6\%$ 以内 (標準偏差 1 σ) であることを確認している。

Fig. 8 Influence of the number of repetitions on the relationship between tactile sensor output and loading time

Fig. 9 Comparisons of output in the case of tactile sensor and quartz pressure sensor

4.2 水晶圧電式圧力センサによる出力較正

前節までに本センサの基本特性評価を行ってきた。しかし、Fig. 6 の較正関係に基づき、本センサ出力を圧力に変換することは、以下の理由により困難であるものと判断された。すなわち、(1)金型設定温度を変化させるたびに較正関係を調査する必要があること、(2)連続成形時では各ショット毎にセンサ周辺温度が微妙に変動すること、(3)センサ出力が安定するまで30ショットも計測を待たなければならないこと、以上3点が理由としてあげられる。

そこで本論文では、本センサの出力特性がFig. 6に示されるようにほぼリニアであることを利用して、水晶圧電式圧力センサを用いた実成形中での圧力変換方法を提案した。本手法は、同一位置 (Fig. 4 のC点) で計測された本センサと水晶圧電式圧力センサ出力を比較して求めた較正式を、残りの224の計測点に適用して全体の定量化を行うものである。

Fig. 9 は、LDPE, PP, GPPS をそれぞれ成形して計測された、Fig. 4 C点での本センサと水晶圧電式圧力センサ出力の比較結果を示している。本センサ圧力は、図中のK点における水晶圧電式圧力センサ出力を基準として、以下の較正式 (1) を用いて変換したものである。

$$P(t) = \frac{P_K}{T_K} \cdot T(t) \quad (1)$$

ここで、 P_K は水晶圧電式圧力センサのK点における出力、 $T(t)$ は本センサの出力、 T_K は本センサのK点における出力、 t は射出開始後の経過時間をそれぞれ示す。

Fig. 9 より LDPE において若干の応答遅れが見られるものの、較正された本センサ圧力が水晶圧電式圧力センサ出力とよく一致していることがわかる。すなわち、水晶圧電式圧力センサ出力によって、本センサ出力の圧力変換が可能であることを物語る結果となっている。

LDPE では、圧力が0に戻る時点 J が水晶圧電式圧力センサのそれとほぼ一致している。しかし、PP, GPPSでは、水晶圧電式圧力センサよりも速く0に戻る傾向を示している。この傾向は特に GPPS において顕著に見られ、樹脂の固化層成長速度に起因するものと推察される。すなわち、GPPSのように成形過程後半において硬くて厚い固化層を形成する樹脂に対しては、圧力伝達ピン直径 d_A が1mmと小さいために、固化層が障害となってピン全面に均等圧が加わりにくくなることが原因と考えられる。これは、圧力伝達ピン方式を用いている本手法の問題点とみなされ、樹脂の種類によってはJ点付近の結果の取り扱いに注意を要することを示唆している。

4.3 キャビティ面圧分布計測

水晶圧電式圧力センサによる圧力変換方法の有効性の実証されたので、以後、本センサ出力の較正は上記方法を用いて行うこととする。

Fig. 10 はキャビティ面圧分布の経時変化の一例を示している。ここでは、全成形過程を通して最もよい較正結果が得られた Fig. 9 (a) の LDPE の計測結果を掲げている。

①の流動過程ではゲートからフローフロントにかけて下りのスロープ状圧力分布を示している。②、③の圧縮・保圧過程ではキャビティ末端部に比べてゲート付近の圧力が若干高くなっており、保圧による補償流動の効果を表している。

ゲートシールが完了する④では、冷却収縮による圧力降下がすでに進行している末端部に比べて、ゲート付近が依然として高い圧力値を維持している。その結果、ゲート付近から末端部にかけて極端な圧力勾配が生じている。ゲート付近が高い圧力値を維持するのは、補償流動による残留圧力に起因するものと考えられる。

⑤、⑥では保圧の効果がキャビティ内に全く及ばなくなり、冷却収縮によりキャビティ周辺部を残すようにして末端部から先に圧力が0に戻って行く。

Fig. 10 Melt pressure distribution profiles inside a mold cavity in the case of 9.0 s holding pressure period (Resin : LDPE, t : Elapsed time after injection start)

Fig. 11 Pressure curve in the case of 5.0 s holding pressure period (Resin : LDPE)

ここで、キャビティ周辺部の圧力が最後に低下する原因は、以下のように考察される。キャビティ周辺部は、三方をキャビティ壁面に囲まれているため、中央部よりも樹脂の冷却が促進される。そのため、周辺部

の樹脂は、圧縮・保圧過程において高い圧力を受けながら急速に冷却される。その結果、結晶化があまり進まない状態で早い段階で固化が行われる。いっぽう、中央部では、周辺部に比べて相対的に緩やかに冷却される結果、ゲートシール後にも結晶化が促進されて、収縮量が周辺部より大きくなる。こうした収縮率の相違が中央部で先に圧力が低下する現象をもたらしたものと推察される。

次に、ゲートシールが完了する前に保圧を終了した場合に、面圧分布状態がどのように変化するかを検討した。Fig. 11は、保圧時間を短くして計測したFig. 4のC点における面圧の経時変化を示している。保圧終了と同時に圧力が急激に低下している。

Fig. 12は、Fig. 11に対応する型内樹脂圧力分布の経時変化を示している。保圧終了以前の圧力分布は、Fig. 10の分布と同様であるためここでは省略した。ゲートシール完了前に保圧が終了したために、①、②ではキャビティ内からランナー内への樹脂の逆流が起こり、それまで高かったゲート付近の圧力が急激に低下

Fig. 12 Melt pressure distribution profiles inside a mold cavity during the cooling process in the case of 5.0s holding pressure period (Resin : LDPE, t : Elapsed time after injection start)

を始める。そして、その後③、④では、ゲート付近から先に圧力が0に戻るというFig. 10とは全く逆の様相を呈している。

このように、各感圧部間の $\pm 6\%$ の出力誤差に起因する多少の凹凸が分布上に見られるものの、保圧時間の変化に対応したキャビティ面圧分布変化を詳細に捉えたこれらの結果は、本計測法の有効性を十分に実証しているものと言える。

5. 結 言

以下に、本研究で得られた結論を列記する。

- (1) 圧力伝達ピンアレイと触覚センサから構成される新しいキャビティ面圧分布計測法を提案した。
- (2) 触覚センサ出力特性の評価実験を行い、各感圧部間の出力誤差(ばらつき)が最大 $\pm 6\%$ (標準偏差1 σ)であること、また、本センサの圧力測定範囲を広げるためには、センサ周辺温度を 35°C 以下に制御する必要があることを確認した。
- (3) 水晶圧電式圧力センサを用いた実成形中における触覚センサ出力の圧力変換方法を提案し、その有効性を確認した。
- (4) LDPEにおいて保圧時間を変化させてキャビティ面圧分布計測実験を行い、ゲートシール時間よりも保圧時間が長い場合にはキャビティ末端部から圧力降下が始まる過程を、逆に保圧時間が

短い場合には、樹脂の逆流によりゲート付近から圧力降下が始まる過程を、面圧分布経時変化として実証的に明らかにした。

本計測手法は、成形プロセス・不良現象の解明、および数値シミュレーション結果の検証に対して有効な手段となるものと考えられる。各感圧部間の出力誤差補正方法を検討し、測定精度をさらに向上させることにより、本計測手法の利用範囲が今後ますます広がるものと期待される。

謝 辞

おわりに、触覚センサに関する技術協力、ならびに計測金型の製作に協力を賜ったニッタ、住友重機械工業に謝意を表します。なお、本研究の一部は、東京大学生産技術研究所の平成5年度民間等との共同研究—V'93 プロジェクト—により遂行されたことを記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 林 博己：プラスチック, **31** (9), 99 (1980)
- 2) 林 雅和：プラスチック 成形技術, **10** (6), 36 (1993)
- 3) 青地保光, 奥山和彦：成形加工, **1**, 415 (1989)
- 4) 西脇信彦, 今野政昭, 崔 愛玲, 堀 三計：成形加工, **5**, 779 (1993)
- 5) 横井秀俊, 高橋重晶, 村田泰彦：成形加工'94, 181 (1994)