集積熱電対センサによる ノズル流路内流動樹脂温度分布計測

村田 泰彦^{*1}, 横井 秀俊^{*1}, 植田 幸治^{*2}

Measurement of Melt Temperature Profile inside the Nozzle of Injection Molding Machine by Integrated Thermocouple Sensor

Yasuhiko MURATA^{*1}, Hidetoshi YOKOI^{*1}, Yukiharu UEDA^{*2}

Measurement of melt temperature in the nozzle of an injection molding machine is very important in clarifying molding phenomena. As stated in the previous paper, the Integrated Thermocouple Sensor consisting of many thermocouples plated on a thin polyimide film was developed to measure the temperature distribution along the cavity depth.

This paper reports on the application of this sensor to measure cross-sectional melt temperature profiles in the nozzle of an injection molding machine. We investigated the effects of several plasticating conditions and screw channel depth at metering zone on the radial temperature distribution of the melt injected through the nozzle, and obtained the following results.

- (1) We confirmed that the Integrated Thermocouple Sensor can be successfully utilized as a practical tool for the investigation of plasticating conditions and screw design.
- (2) Even if screw channel depth at metering zone, screw feed stroke or revolution rate change, the melt temperature deviation in the nozzle channel is at a maximum in the center of the region between the channel center and the channel wall. As the screw channel depth at metering zone decreases or the feed stroke increases, the maximum deviation increases.
- (3) As the melt residence time in the reservoir increases, the temperature deviation distribution flattens.
- (4) The temperature deviation distribution is closely related to how the melt accumulates in the reservoir during the charging process as well as the melt flow behavior in the nozzle channel during the injection process.

Key Words: Injection molding/Measurement/Nozzle/Temperature distribution/
Integrated Thermocouple Sensor

^{*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} 元ムネカタ(株) 化成品事業部 成形技術部
高槻市辻子1-1-30 (〒569)
Munekata Co., Ltd. (in former times)
1-1-30 Zushi, Takatsuki-shi, Osaka 569 Japan
1995. 10. 18 受理

1. 緒 言

射出成形における不良現象は、樹脂の温度分布状態と密接な関係があると言われている。そのため、加熱シリンダー内において、いかなる温度分布状態で樹脂が可塑性・計量され、ノズルから射出されるかを把握することは、型内樹脂温度分布計測と併せて重要な課

Fig. 1 Sensor installation method in the nozzle

題となっている。特にノズル部は金型の直前に位置しているため、この部分で樹脂温度分布を詳細に計測することは、成形現象を解析するうえで最も基本的なことから考えられてきた。

ノズル部における樹脂温度計測法として、現在、赤外線放射温度計測法^{1),2)}、および超音波温度計測法³⁾、シース熱電対を用いた計測法^{4),5)}が利用されている。赤外線放射温度計測法および超音波計測法は、高い応答性に加えて、樹脂の流れを阻害せずに計測できるなどの優れた特徴を有している。しかし、これらはスポット計測法であるため、ノズル流路内半径方向の温度分布計測には適用できないという問題点を有している。いっぽう、シース熱電対法は、1本の熱電対を流路内に挿入して計測する場合がほとんどである。そのため、温度分布計測を行うには、熱電対挿入位置をその都度移動させるような煩雑な作業が必要となる。

著者の一部は、前報⁶⁾において金型キャビティ厚さ

Table 1 Screw dimensions (Units : mm)

Screw diameter	φ36
Screw channel depth of metering/feed zone	①3.3/6.5 ②2.0/6.5
Screw pitch	35
Zone length of metering compression/feed	150/220/350

方向の樹脂温度分布を高集積度、高位置決め精度で計測することを目的として、薄いポリイミド基板上に多数の熱電対パターンをめっきにより形成した集積熱電対センサを提案した。

本論文では、この集積熱電対センサを応用したノズル流路内樹脂温度分布計測法を提案し、同手法を用いて、可塑化条件、スクリュ計量部溝深さが連続射出動作中のノズル流路内樹脂温度変動に及ぼす影響について検討を行った。以下にその概要を報告する。

2. 実験方法

2.1 ノズル流路内温度分布計測装置の基本構造

Fig. 1 はノズル流路内樹脂温度分布計測装置の基本構造を示している。集積熱電対センサ（以後本センサと呼称する）の原理、構造、基本特性については前報に詳しいので、ここでは省略する。まず、先端部が半割れ構造となっているノズルA上に、本センサを設置する。次にXYテーブルを用いて本センサをノズル流路上に精度よく位置決めした後、ノズルカバーBにより挟み込んで固定する。最後に、この計測装置を成形機加熱筒に装着する。本手法の主な特徴を以下に列記する。

(1) 狭いノズル流路内およびノズル本体内の温度分布を高位置決め精度でいちどに計測できる。

(a) Cross-section of the experimental apparatus (Units:mm)

(b) Sensor's position

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental set-up and the sensors position installed in the nozzle

Table 2 Plastication conditions

Temperature	(°C)	200
Injection rate	(cm ³ /s)	6.6
Revolution rate	(rpm)	30/60/90/120/150
Feed stroke	(mm)	25/50/75/100
Screw back pressure (MPa)		0
Waiting time	(s)	0/20/40

(2) センサの厚さが 100 μ m と薄いため、シース熱電対よりも優れた応答性 (63.2%応答に要する時間が 90ms⁶⁾) が得られる。

2.2 計測方法

Fig. 2 は、計測装置の断面形状、および本センサの主要寸法、装填位置を示している。本センサでは、Cu と Ni のめっきによりパターン形成された 28 対のカップリング部が、8.4 mm の測定範囲内に 0.3 mm 間隔で配されている。本実験では、流路出口から 20 mm の位置 C に本センサを装填し、ノズル流路内の他にノズル本体内の温度も計測できるようなカップリング部の配置を行った。各熱電対の生成熱起電力は、直流増幅器 (共和電業製 DA-510 B) を通してトランジェントメモリ (エレクトロニカ製 ELK-6000) に記録した。

2.3 実験条件

Table 1 は、本実験で使用したスクリュの諸元を示している。本論文では、スクリュ供給部溝深さを 6.5 mm 一定として、計量部溝深さを 2 通りに変化させたスクリュで評価を行った。本実験では、5 個所に半円形の樹脂通過溝が設けられたスクリュヘッドを用いた。実験に使用した射出成形機は、東洋機械金属製の Ti-80 G (型締力 80 トン) である。

Fig. 4 Deviation curves of the melt temperature in the nozzle during the injection process under 50 mm feed stroke (Shot number : 20, Screw channel depth : 3.3 mm, Revolution rate : 90 rpm, Waiting time : 0 s)

Fig. 3 Relationship between temperature and shot number (Position : 1.95mm, Revolution rate : 90 rpm, Feed stroke : 50 mm, Waiting time : 0 s, Elapsed time after injection starts : 7.0 s)

Table 2 に本実験の可塑化条件を示す。本論文では、計量回転速度、計量ストローク、滞留時間を変化させて評価を行った。実験に使用した樹脂は、ポリプロピレン (三井石油化学工業製 ハイボール J 900) である。本実験では金型内への射出は行わず、クッション量をゼロとした空射状態で計測を行った。計量中の樹脂流出を防ぐために、本装置にはノズル外部からのシャットオフ機構が備わっている。計量・射出のサイクルを 40 回繰り返して、温度分布計測を行った。その際、計量過程の前後には、それぞれ 5 秒と 6 秒の休止時間が設定されている。また本論文では、リザーバー内における樹脂の滞留時間が温度分布に及ぼす影響についても検討を行った。具体的には、計量と射出過程との間に、上記休止時間とは別に 20 秒、40 秒の滞留時間をそれぞれ設定し、計測を行った。ただし、計量回転速度およびストローク、スクリュ計量部溝深さの影響検討実験では、滞留時間は 0 秒とした。

3. 実験結果および考察

3.1 ノズル流路内樹脂温度のショット間変動

Fig. 3 は、40 回連続射出動作を行ったときの、射出開始 7 秒後における樹脂温度とショット回数との関係を示している。計量位置は $R=1.95$ mm である。計測に際しては、加熱筒内の樹脂をバージによりほとんど空にした状態から実験を開始した。計測開始後すぐに温度が低下し始め、10 ショット目以降において温度が安定する傾向を示している。

以上の結果に基づき、本論文では 40 ショット分の計測結果の中から、温度が安定する 20 ショット目以降の 15 ショット分のデータを評価の対象として以後の検討を進めることとした。具体的には、各計測位置での射出開始から任意時間経過時における温度を、それぞれ 15 ショット分抽出し、それらから算出された標準偏差 1σ を温度偏差とみなすこととした。

Fig. 5 Radial temperature profiles on the average of 15 shots(Screw channel depth: 3.3 mm, Feed stroke : 50 mm, Waiting time : 0 s, Elapsed time : 7.0 s)

3.2 計量回転速度の影響

Fig. 4 は、スクリュ計量部溝深さ 3.3 mm, 計量回転速度 90rpm, 滞留時間 0 秒の条件で計測した, 20 ショット目のノズル流路内樹脂温度の経時変化を示している。温度が立ち上がった直後の $T=1$ s から 2 s の間は比較的平坦な温度状態を示し, その後, $R=1.95$ mm の位置でうねり状の温度変動が現れる。また, 射出後半に向かうにしたがって, 壁面近傍 ($R=4.05$ mm) を除くすべての領域で温度が低下する傾向を示している。ここで $T=2$ s は, 直前の 19 ショット目において流出せず, ノズル流路内およびスクリュヘッドとチェックリングとの隙間内に残留していた樹脂が, ほぼ射出を完了する時刻に相当すると推定された。また, これらの樹脂は, 狭い部分で長時間にわたりノズル・加熱筒から熱を受けているために均熱化されており, その結果, 平坦な温度状態を示したものと推察される。

Fig. 5 に, 計量回転速度を変化させて計測したノズル流路内樹脂温度分布を示す。同図の温度は, 各計測

Fig. 7 Deviation curves of the melt temperature in the nozzle during the injection process under 100 mm feed stroke(Shot number : 25, Screw channel depth : 3.3mm, Revolution rate : 90 rpm, Waiting time : 0 s)

(a) Influence of the elapsed time (Revolution rate: 90rpm)

(b) Influence of revolution rate (Elapsed time: 7.0s)

Fig. 6 Temperature deviation distribution along the radial direction inside the nozzle channel(Screw channel depth : 3.3 mm, Feed stroke : 50 mm, Waiting time : 0 s)

位置での 15 ショット分の平均値を示している。一般に計量回転速度が高くなるに伴って可塑性能力が増加し, 結果として樹脂の可塑性に必要な所要時間が短くなる。そのため熔融不足が生じやすく, 壁面近傍を除く全域で温度低下が起こっているものと推察される。

Fig. 6 は, 15 ショット分のデータから求めた流路内各位置での温度偏差を示している。(a)は射出開始からの経過時間の影響を, (b)は計量回転速度の影響を示している。両者とも, Fig. 4 においてうねり状の温度変動が見られた $R=1.95$ mm の位置で, 温度偏差が

Fig. 8 Influence of feed stroke on temperature deviation curves of the melt injected through the nozzle channel(Shot number : 25, Position : 1.95 mm, Screw channel depth : 3.3 mm, Revolution rate : 90 rpm, Waiting time : 0 s)

Fig. 9 Influence of feed stroke on temperature deviation curves inside the nozzle channel (Position : 1.95 mm, Screw channel depth : 3.3 mm, Revolution rate : 90 rpm, Waiting time : 0 s)

ピークを形成し、流路中央および壁面に近づくほど温度偏差が減少する傾向を示している。ピーク値は、射出の後半に向かうほど、また、計量回転速度が高くなるほど、流路中央($R=0.2$ mm)および壁面付近($R=3.8$ mm)を除くすべての領域で増加傾向を示している。これらの原因については、4章で詳細に検討することとする。

3.3 計量ストロークの影響

Fig. 7は、計量ストロークを100 mmに設定して計測した、25ショット目の樹脂温度の経時変化を示している。壁面近傍($R=4.05$ mm)を除く流路中央部では、流動中半から後半にかけてうねり状の温度低下が見られる。このうねりは、特に $T=8$ s以降で顕著になっている。スクリュ溝容積を計算した結果から、上記時間帯は、前ショットでスクリュ圧縮部に留まっていた樹脂が、次の計量過程を経て射出される際に、センサ部を通過する時刻と推定される。圧縮部では溝深さがホッパー側に向かって徐々に深くなっている。このため、加熱筒からの移入熱量が溝内の樹脂全体に十分に伝達されにくいことが、こうした温度低下の原因と考えられる。

Fig. 8に、計量ストロークを変化させて計測した、樹脂温度の経時変化を示す。ここでは、温度偏差がピーク値を示す $R=1.95$ mmの位置での結果のみを掲げている。計量ストロークが25 mmの場合には、変動のない平坦な温度状態を示す。しかし、ストロークが長くなるに伴い、射出過程の中程から後半にかけて温度変動および低下が著しくなっている。またこれとは別に、壁面近傍($R=4.05$ mm)では計量ストロークが変化しても、Fig. 7と同様のうねりのない平坦な温度状態を示すことも確認されている。これらの原因については、4章で詳細に検討することとする。

Fig. 9は、計量ストロークを変化させて計測した場合の温度偏差の経時変化を示している。計量位置は R

Fig. 10 Deviation curves of the melt temperature in the nozzle during the injection process under the screw channel depth of 2.0 mm (Shot number : 25, Revolution rate : 120 rpm, Feed stroke : 50 mm, Waiting time : 0 s)

$=1.95$ mmである。同図のように、計量ストロークが長く、また射出後半へ向かうに従い、温度偏差は増加する。この原因は以下のように考えることができる。すなわち、1計量サイクルの間で、最初に計量される樹脂は、最後に計量される樹脂に比べて、計量ストローク分だけ長くスクリュで可塑化されることになる。したがって、計量ストロークが長くなるほど、両者の可塑化状況の差異が大きくなり、温度不均一領域の生成および温度低下現象をもたらすと推察された。

3.4 スクリュ計量部溝深さの影響

Fig. 10は、計量部溝深さ2.0 mmのスクリュにおける樹脂温度の経時変化を示している。 $T=6$ s以降に、 $R=1.95$ mmの位置で若干の温度低下aが見られる。 $T=6$ sは、前ショットで圧縮部に留まっていた樹脂が、計量過程を経て射出され、センサ部を通過し始める時刻と推定される。したがって、前項と同じ理由により温度低下が起こったものと推察される。また、計量部溝深さ2.0 mmでは、3.3 mmの場合に比べてかなり平坦な温度状態を示している。これは、スクリュ計量部溝深さが浅く、(1)溝の内部まで均熱化が進みやすいこと、(2)計量時間が長くなることに起因すると考えられる。また、ここには示されていないが、計量ストロークが長くなるにしたがい、計量部溝深さ3.3 mmと同様に後半の温度低下が激しくなることも確認されている。

Fig. 11に、計量回転速度を変化させて計測した温度偏差分布を示す。この場合も溝深さ3.3 mmのときと同様に、 $R=1.95$ mmの位置で温度偏差はピーク値を示し、その値は同3.3 mmの場合の60~70%となっている。

3.5 滞留時間の影響

Fig. 12は、スクリュ計量部溝深さ2.0 mmにおいて

Fig. 11 Temperature deviation distribution along the radial direction inside the nozzle under the screw channel depth of 2.0 mm (Feed stroke : 50 mm, Waiting time : 0 s, Elapsed time : 7.0 s)

Fig. 12 Influence of waiting time on temperature deviation distribution along the radial direction inside the nozzle channel (Screw channel depth : 2.0mm, Revolution rate : 120 rpm, Feed stroke : 50 mm, Elapsed time : 7.0 s)

樹脂滞留時間を変化させて計測した、射出開始から7秒後の温度偏差分布を示している。20秒以上の滞留時間により温度偏差分布が一様に平坦化していることから、リザーバー内の樹脂温度もほぼ均一になっているものと推察される。また、このときの流路中央付近の樹脂温度は、射出過程後半においても低下せず、ノズル設定温度と同じ200°Cを示すことが確認されている。

4. 温度偏差ピークの発生機構

スクリュ計量部溝深さ、計量回転速度、計量ストロークにかかわらず、(1)温度偏差が $R=1.95\text{mm}$ の位置で最も大きくなること、(2)射出後半に向かうほどその値が大きくなることが確認された。この原因を、Fig. 13を用いて考察する。

同図は、前章で得られた結果および著者の一部らによって報告されているリザーバー内樹脂挙動の可視化実験結果⁷⁾に基づき、計量・射出中のノズル・リザー

Fig. 13 Estimated model of melt behavior inside the reservoir and nozzle channel

バー内樹脂温度分布状況を推定したものである。前ショットにおいて(a)のようにスクリュヘッドとチェックリングとの間の狭い隙間などに滞留していた均一な温度の樹脂①が、(b)において計量開始と同時に最初にリザーバー内に流入する。引き続き、スクリュ計量部溝内で待機していた樹脂①よりも温度が不均一な樹脂②が(c)のようにリザーバー内に流入してくると、樹脂①はスクリュヘッド先端方向に押し流される。いっぽう、スクリュヘッド先端近傍の樹脂は、スクリュヘッドとともに回転しながら後退し、ノズル先端方向へは移動しないことが報告されている⁷⁾。したがって、この場合、スクリュヘッド近傍には、温度の均一な樹脂①が分布しているものと考えられる。さらに、スクリュ圧縮部に滞留していた溶融の不十分な樹脂③が、(d)のように樹脂②と同様にして計量される。このとき、加熱筒壁面付近の樹脂は、加熱筒からの伝熱により均熱化されているものと推察される。

以上のようなプロセスで計量された樹脂が射出されると、温度の均一な樹脂①が流路中央およびノズル壁面近傍を通り、温度の不均一な樹脂②③がその間に侵入する形で順次通過する(e)に示すような流動挙動を示すものと推定された。こうした樹脂の流動挙動は、ノズル中心と壁面の中間位置で温度偏差が最大となること、また、時間経過に伴い温度偏差が増加することを合理的に説明することができる。なお、流動過程の大幅な温度変動現象は、恐らくソリッドベッドのブレイクアップなどの可塑性不安定現象が上記の樹脂流動パターンに重畳しているものと想像される。

5. 結 言

以下に、本論文で得られた結論を列記する。

- (1) 40ショットの PP 連続射出実験を通じて、集積熱電対センサを用いたノズル流路内樹脂温度分布計測法が、可塑化条件、スクリュ形状の評価に対し有効であることを示した。
- (2) スクリュ計量部溝深さ、計量回転速度、計量ストロークにかかわらず、ショット中の温度偏差は、ノズル流路中央と流路内壁面との中間に当たる約 2 mm の位置でピーク値を示す。そして、計量部溝深さが小さく、射出過程の後半に向かうほど、さらに、計量ストロークが長くなるほど、その値が増加することを確認した。
- (3) リザーバー内における樹脂の滞留時間が長くなるに伴い、温度偏差分布が平坦化することを確認した。
- (4) 上記の温度偏差のピーク値と流動過程での温度変動を、計量過程におけるリザーバー内での計量樹脂の配置状況、およびその後の射出時におけるノズル流路内樹脂流動挙動と密接に関係づけるモデルを提示した。

本論文では、空射状態での計測実験にとどまっている。ここで計測された温度偏差分布の樹脂が金型内に射出された場合に、成形品にいかなる影響が及ぶかを具体的に検討することが、今後の課題と考えられる。

そのためには、本センサの耐久性のさらなる改善が期待される。

謝 辞

集積熱電対センサの製作に御協力下さいましたヤマハ発動機塚越洋氏、ならびに実験に御協力下さいました東レの坂井秀敏氏、ポリプラスチックの西芳夫氏、リコーの平野彰士氏に謝意を表します。また、計測装置の製作および樹脂をご提供下さいました東洋機械金属、三井石油化学工業の両社に御礼申し上げます。

本研究の一部は、東京大学生産技術研究所の平成 2 年度民間等との共同研究—V'90 プロジェクト—により遂行されたものであることを記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Galskoy, A., and Wang, K. K.: *Plast. Eng.*, **34**, 42 (1978)
- 2) 林 博巳：プラスチック, **31**, (9) 99 (1980)
- 3) 西脇信彦, 今野政昭, 崔 愛玲, 堀 三計：成形加工, **5**, 772 (1993)
- 4) Amano, O., Utsugi, S.: *Polym. Eng. Sci.*, **28**, 1565 (1988)
- 5) 西脇信彦, 今野政昭, 崔 愛玲, 橋本展明, 堀 三計：成形加工, **5**, 800 (1993)
- 6) 横井秀俊, 村田泰彦, 塚越 洋：成形加工, **8**, 107 (1996)
- 7) 横井秀俊, 黒田章公：成形加工 '94, 185 (1994)