射出成形機加熱筒内の温度測定

——成形過程中の温度変動と分布——

木村照夫^{*1}・竹内正紀^{*1}・橋本 憲^{*1}

津田慶司^{*2}・村上真二^{*2}・早崎 進^{*2}

Temperature Measurement in Heating Cylinder of an Injection Molding Machine

—Temperature History and Distribution during Molding Process—

Teruo KIMURA^{*1}, Masanori TAKEUCHI^{*1}, Akira HASHIMOTO^{*1}

Keiji TSUDA^{*2}, Shinji MURAKAMI^{*2}, SUSUMU HAYASAKI^{*2}

The effects of molding conditions, such as the set temperature of the band heaters and the screw rotation rate, on the temperature history and distribution in the heating cylinder have been studied by measuring the barrel temperature and the temperature at the screw surface. The temperature history at the screw surface during the molding process was measured by using a thermocouple telemetry system. The measured results were compared with the set temperatures of the heaters. Representative PP and PS resins were used in the experiments.

The observed temperature distribution along the screw axis indicates a steep temperature rise at the feed zone, and it differs largely from the set values. The set temperature at the feed zone notably affects the temperature of the polymer melt in the compression and metering zones. The results obtained in this study will be useful for an optimum design of the heating cylinder and also for the construction of a CAE model.

Key Words : Injection molding/Temperature measurement/Surface temperature of screw/Temperature history

1. 緒 言

射出成形機加熱筒では樹脂を均一かつ迅速に可塑化することが要求され、この要求を満足するスクリュー形

状、成形条件などの検討が種々なされている。例えば Amano ら^{1)~3)}はノズル部手前のリザーバー内の樹脂温度を独自の方法で測定し、成形条件あるいはスクリュー形状が可塑化樹脂温度に及ぼす影響を考察し多くの知見を得ている。また、横井ら⁴⁾は可視化のできる加熱筒を用いて内部樹脂流動の観察を行い、可塑化挙動の解明に大きく貢献している。さらに近年、多田ら⁵⁾、あるいは赤坂ら⁶⁾は樹脂の可塑化メカニズムの解明、あるいは最適成形条件の設計のための CAE プログラムの開発を試み、ある程度の成功を収めている。

しかし、射出成形における可塑化現象は非常に複雑であり、加熱筒の最適設計に対してはまだまだ実測デ

^{*1} 福井大学 工学部

福井市文京 3-9-1 (〒910)

Faculty of Engineering, Fukui University

3-9-1, Bunkyo, Fukui-shi, Fukui 910 Japan

^{*2} 東洋機械金属(株)

明石市二見町福里 523-1 (〒674)

Toyo Machinery & Metal Co., Ltd.

523-1, Fukusato, Futami-cho, Akashi-shi, Hyogo 674

Japan

1993. 8. 1 受理

Fig. 1
Schematic diagram
of apparatus

Fig. 2
Position of thermocouples
attached on
heating barrel and
screw surface

ータが不足しているように思われる。通常、加熱筒の温度設定はバレル内に埋め込んだ温度センサーによってなされるが、このセンサー部の温度と樹脂温度とは必ずしも一致せず、設定温度と樹脂温度との関係を明確にしておくことは設定温度の決定および可塑化現象を把握する上でも重要である。また、実用的な CAE モデルの構築に際してもより多くの実測データの提示が不可欠である。

そこで本研究では加熱筒内の樹脂の可塑化情報の一つとして、現在まであまり測定されることのなかった成形過程におけるスクリュー表面の樹脂温度の変動と分布をバレル部温度とともに詳細に測定し、成形条件が加熱筒内の温度場に及ぼす影響を考察し、種々の知

見を得た。なお、本報ではバンドヒーターを取り付けた周囲筒をスクリュー部と区別してバレル部と呼び、また、ノズル部、スクリュー部およびバレル部をまとめて加熱筒部と呼ぶことにした。

2. 実験装置と方法

実験には 東洋機械金属製の 射出成形機 PLASTAR Ti-30 G を計装化して用いた。使用したスクリューは、スクリュー径 $D=24$ mm, 計量部溝深さ 1.8 mm, 供給部溝深さ 4.2 mm, 圧縮比 2.1, $L/D=20$ (L : スクリュー長) のフルフライトタイプである。実験装置システムの概略を Fig. 1 に示す。成形過程中的温度分布と温度変動を測定するためには、Fig. 2 に示すようにバレル部 12 箇所 (0~11) とスクリュー部 7 箇所 (A~G) に素線径 0.2 mm の C-A 熱電対を取り付けた。すなわち、バレル部は外表面より半径方向に細穴を設け、内表面より 2.5 mm に温接点が位置するように熱電対を取り付けた。いっぽう、スクリュー部は Fig. 3 に示すように隣接するフライト間の中央位置に小さな溝を設け、温接点がスクリュー表面に位置するようにスクリュー内部より熱電対を挿入し、接着剤 (スリーボンド製耐熱性無機接着剤 3732) で固定した。なおこのとき、スクリューと熱電対間の熱移動、および熱電対を介して系外部に熱が逃げるのを極力避けるために Fig. 3 に

Fig. 3 Schematic sketch of thermocouple
installed on the screw surface

Table 1 Set temperature of band heaters
(°C)

Case	Heater 1	Heater 2	Heater 3	Heater 4
a	210	210	210	210
b	210	210	205	200
c	205	205	200	195
d	200	200	195	190
e	210	210	205	180
f	210	210	205	160

Table 3 Properties of used PP resin

Density	(kg/m ³)	0.91×10 ³ (23°C)
Specific heat	(kJ/kg·K)	1.926 (20~60°C)
Thermal conductivity	(J/sec·m·K)	1.172×10 ⁻¹
Heat of fusion	(kJ/kg)	209.3±29.3
Melting point	(°C)	176

示すように熱電対がスクリュー鋼部に直接接触しないように、かつ温接点近傍を渦巻状にして接着した。これら温接点と氷水で作られた冷接点との間に生じる起電力を Fig. 1 のようにデータアクシジョンコントローラ（日本電気三栄製）を介してコンピューターに取り込み、あらかじめ校正された起電力-温度関係式より温度を求めた。回転するスクリュー部の起電力に関しては無線でデータを取り込める熱電対テレメトリーシステム（立山電子製モデル 837）を用いた。また、成形過程中に移動するスクリュー位置は変位計を用いて測定した。

実験ではスクリュー回転数と加熱筒バンドヒーターの設定温度を種々変化させた。すなわち、回転数 N は $N=50, 100, 155$ および 250 rpm とし、バンドヒーターに関してはセンサー 1～センサー 4（C-A 熱電対）を用いて 4 分割されたヒーター 1～ヒーター 4 の温度を Table 1 に示す値にそれぞれ PID 制御した。その他の主な実験条件を Table 2 に示す。可塑性状態は樹脂の物性によって大きく支配されるが、本研究では射出成形に良く用いられる結晶性である PP（ユニオンポリマー製 UP ポリプロ W 101）と非結晶性である PS（電気化学工業製 GP-1-301）を使用した。樹脂メーカーより提供された使用樹脂の代表的な物性値をそれぞれ Table 3 と Table 4 に示す。

3. 結果と考察

各バンドヒーターの制御点の温度が所定の設定温度になり、充分時間が経過した後、成形実験を開始した。Figs. 4, 5 はそれぞれ成形開始後のバレル部温度とスクリュー表面の樹脂温度の変動を一例として PP の場合

Table 2 Molding conditions for experiments

Metering stroke	40 (mm)
Shot volume	18.1 (cm ³)
Back pressure	7.84×10 ⁵ (Pa)
Suckback pressure	2.94×10 ⁶ (Pa)
Injection rate	33 (mm/s)
Injection pressure	7.85×10 ⁶ (Pa)
Holding pressure	1.96×10 ⁶ (Pa)
Mold clamping force	2.65×10 ⁵ (N)

Table 4 Properties of used PS resin

Density	(kg/m ³)	1.05×10 ³
Specific heat	(kJ/kg·K)	1.423
Thermal conductivity	(J/s·m·K)	1.163×10 ⁻¹

について示している。図より明らかなように、成形が開始されると、初め各测温点の温度は急激に低下し、その後、時間の経過とともにそれぞれ一定値を基準に変動するようになる。この初めの急激な温度低下は成形開始と同時に低温の固形樹脂がホッパーから供給されるために生じる。したがって、とくにスクリュー表面ではホッパーに近い测温点ほど大きな温度低下となって現れている。Fig. 5 にみられる細かな振動波形は後述する成形 1 ショットにおける温度変動に対応している。バレル部温度も細かく振動するが、周期は必ずしも成形サイクルと一致していない。これはバレル部ではバンドヒーターの PID 制御のサイクル (25 s) と成形サイクル (17.2 s) が異なり、その影響が重なり合っているためと考えられる。充分時間が経過した後

Fig. 4 Temperature history in heating barrel during molding process
(PP, $N=155$ rpm, Case b)

Fig. 5 Temperature history at screw surface during molding process (PP, $N=155$ rpm, Case b)

Fig. 6 Temperature distribution along screw axis in heating cylinder for various screw rotation rates (Case b)

リュ表面の樹脂温度の変動に比べて小さく、最大 0.5°C 程度である。これは、バレルの熱容量が大きいこと、およびバレル部ではバレルの内部温度を測定しているためと考えられる。なお、測定点 11 に見られる大きな周期をもつ温度変動は、この測温点がホッパー下に隣接しており、水道水の流れを ON-OFF させることによるホッパー下の単純な温度制御の影響が現れているものと考えられる。

以上のような加熱筒内の温度変動の様子は PS についても同様であった。いずれの点においても 300 s 程度 (約 17 ショット) で温度低下はおさまリ、約 1500 s (約 87 ショット) 後では巨視的には充分再現性がある現象が繰り返されている。したがって以後、成形開始後 1500 s 以上たった状態を対象に加熱筒内の温度分布および 1 ショット当たりのスクリュ表面の樹脂温度の変動を考察する。

3.1 加熱筒内の温度分布

まず、スクリュが最前進限にあるとき (射出完了時) のスクリュ表面の樹脂温度の分布とバレル部温度の関係について述べる。Fig. 6 (a), (b) はスクリュ表面の樹脂温度の分布をバレル部温度と共にそれぞれ PP と PS について種々のスクリュ回転数に対して示している。図中にはヒーター制御用センサー位置の測定温度 (これは各ヒーターの設定温度に等しい) も示してある。図より明らかなようにホッパー近くでは低温のホッパー下温度 (40°C) の影響によりバレル部の温度勾配が大きくなり、したがって、特に制御センサー位置より左方の温度は設定温度よりもかなり高

温になることがわかる。この影響のためスクリュ表面の樹脂温度も高温となり、後述するように射出過程でスクリュの移動とともに高温部が前方に移動するため、特に PS の、D, E 点付近ではスクリュ表面の樹脂温度がその断面のバレル部温度よりも高くなる場合があることを示している。

また供給部では回転数が低いほど樹脂の移動速度が遅く、バレル部からの熱移動の時間が長くなり、スクリュ表面の樹脂温度はバレル部温度の影響を受けやすいことがわかる。比熱の小さい PS は PP に比べて供給部での温度上昇が早く、バレル部との温度差がよりホッパー側で小さくなる。また、PS においては圧縮および計量部のスクリュ表面の樹脂温度はバレル部温度よりも高くなる場合があることがわかる。これはせん断発熱による温度上昇が設定温度を越える結果生じるものと考えられ、したがって回転数が大きいほど温度も高くなっている。

Fig. 7 (a), (b) はスクリュ表面の樹脂温度分布に及ぼす設定温度の影響を、また Fig. 8 (a), (b) はバレル部とスクリュ表面の樹脂温度の温度差を PP を例に示している。各図とも (a) はヒーター 2～ヒーター 4 の温度を、また (b) はホッパー側のヒーター 4 の設定温度のみを Table 1 に示すように変化させた場合の結果である。Fig. 7 (a) において Case b～Case d では 5°C ずつ温度が低く設定されているが、定性的に同様な温度分布を示すことがわかる。ホッパー側のヒーター 4 の設定温度のみを変化させた場合には Fig. 7 (b) に示されるように設定温度が低い

Fig. 7 Temperature distribution along screw axis in heating cylinder for various set temperatures of band heaters (PP, $N=155$ rpm)

定温と、スクリュ表面の樹脂温度も低くなり、上流側の設度の影響が同一温度に設定されている下流側のB点あたりまで大きく現れている。このような結果は図には示していないが、PS の場合についても同様であった。

バレル部温度とスクリュ表面の樹脂温度との差は Fig. 8 (a), (b) より明らかなようにホッパー近くでは設定温度が高いほど大きくなる。このことは、設定温度を高くしても、それに見合った樹脂温度の上昇が期待できないこと、および同一断面における樹脂温度のばらつきが大きくなることを示唆している。しかし、設定温度が高いとノズル側に行くに従って温度差は急速に減少し、ノズルにより近い位置では設定温度による上記温度差の差異はあまり生じなくなる。すな

わち、圧縮部、計量部の温度の均一化のためには供給部の温度を適当に高める必要があるといえる。

Fig. 9 (a), (b) は同様の温度差の結果を PS について示している。図より明らかなように PS の場合には供給部である F, G 点では設定温度の高い方が PP の場合と同様にバレル部温度との差が大きくなるが、E点より前方では設定温度による影響があまり見られず、しかも設定温度にかかわらず、A~C 点付近ではスクリュ表面の樹脂温度がバレル部温度よりも高くなること（負の温度差）を示している。すなわち、PS は PP に比べてせん断発熱による温度上昇が大きくなり、バレル部温度の影響が小さくなるものと考えられる。

以上のように本節ではスクリュ位置が最前進限にあ

Fig. 8 Temperature difference between barrel and screw surface for various set temperatures of band heaters (PP, $N=155$ rpm)

Fig. 9 Temperature difference between barrel and screw surface for various set temperatures of band heaters (PS, $N=155$ rpm)

る状態での温度場に及ぼすスクリュの回転数とヒーターの設定温度の影響が明確になったが、次節ではスクリュの移動とともに変化する温度場について考察する。

3.2 スクリュ表面温度の変動

Fig. 10 は Case b の設定温度で成形過程中的スクリュ表面の樹脂温度の変動の代表例を F 点を対象に、PP の結果について数ショット分示している。図より明らかなように、各ショットにおいて温度変動の若干の差異がみられるが、回転数すなわち成形サイクルの大きさに応じてほぼ一定の周期と振幅で温度変動する。

Fig. 11 は、このような温度変動の代表的な 1 ショット分を A, D, F の測温点に対し、横軸にスクリュストローク（スクリュ最前進限からの距離）をとって書き改めたものである。図より知られるように、いずれの測温点においても計量過程では、スクリュの後退と共に温度上昇する。これは、特に樹脂温度の低い F 点ではスクリュの回転に伴う溶融樹脂のバレル表面からスクリュ表面への流動による熱移動の影響が現れているものと考えられる。また、D 点では回転数が高いほど温度上昇が大きくなるが、これは圧縮部に近い D 点では回転数の増加とともにせん断発熱が大きくなる効果が大きく現れているものと考えられる。したがって、回転数の低い $N=50$ rpm ではほとんど温度変動がみられない。計量部の A 点ではいずれの回転数においても温度変動が小さく、回転数による温度の違いも小さくなっている。

計量が終了し、スクリュが停止するといずれの測温点とも温度低下する。これは計量過程ではフライト間

Fig. 10 Effects of screw rotation rate on temperature history at screw surface during molding process (Point F, PP, Case b)

における局所的な樹脂流動によってバレル部表面とスクリュ表面の樹脂温度に比べて樹脂層内部の温度は低くなっているものと考えられ、スクリュ停止時の熱伝導による樹脂温度の均一化の影響が現れているものと考えられる。射出過程ではいずれの測温点ともスクリュの移動に伴う温度変動がほとんどみられない。このことより、スクリュ表面近くに存在する樹脂層は射出過程において射出開始時の温度を保持したままスクリュと共に前方へ移動するものと考えられる。このことが前節で示した高温樹脂が前方に送られることによるバレル部温度とスクリュ表面の樹脂温度の逆転現象と関連している。

なお、F 点、D 点では回転数が高いほど低温レベルで温度変動しているが、これは回転数が高いほど樹脂の移動速度が早くなり、バンドヒーターの熱の樹脂への伝わりが悪くなるためと考えられる。図には示していないが、これらの温度変動の特徴は PS の場合についても概略同様であった。

Fig. 12 はスクリュ回転数が $N=155$ rpm において、バンドヒーターの設定温度を種々変化した場合のスクリュ表面各点の温度変動を PP を例に示している。図よりわかるように、供給部の F 点においては設定温度が高いとバレル部から樹脂への伝熱量も大きく、1 ショット当たりの温度変動幅も大きくなる傾向にある。しかし、圧縮部に近い D 点では設定温度が低いほど温度変動が大きくなる。これは設定温度が低いと供給部でのバレル部から樹脂への伝熱量が小さく、より低温

Fig. 11
Temperature history during one shot of molding process for various screw rotation rates (PP, Case b)

Fig. 12
Temperature history during one shot of molding process for various set temperatures of band heaters (PP, $N=155$ rpm)

の樹脂が測温点Dに流入し、せん断発熱量が大きくなることによる温度上昇の効果が大きく現れるためと考えられる。計量部のA点においては設定温度にかかわらず温度変動は小さくなることがわかる。

4. 結 言

本研究では、成形過程における射出成形機加熱筒のバレル部およびスクリュ表面の樹脂温度の変動と分布を測定し、加熱筒設定温度とスクリュ回転数が加熱筒内の温度場に及ぼす影響を明らかにした。主な結果を以下に要約する。

- ① 設定温度と樹脂温度は特にスクリュ供給部で大きく異なり、このことはPPに見られるように比熱の大きな樹脂に対して顕著となる。
- ② 計量過程ではスクリュの後退とともに、特に供給部ではバレル部表面からスクリュ表面への樹脂流動に伴う熱移動により、また圧縮部では回転数が大きくなるとせん断発熱の効果によりスクリュ表面の樹脂温度は上昇する。
- ③ 高回転数の計量過程においては、せん断発熱による温度上昇が大きくなると、特にPSに見られるように圧縮部、計量部で樹脂温度が設定温度を上回る場合が生じる。
- ④ 供給部の設定温度は、計量部の樹脂温度にまで影響を及ぼすことがある。
- ⑤ 射出過程ではスクリュ表面上の樹脂はほとんど温度変化することなくスクリュとともに前方に移動する。

本文中に提示されている種々の温度情報は、加熱筒の最適設計のみならず、CAEモデルの構築に対しても有用であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) Amano, O. and Utsugi, S.: *Polym. Eng. Sci.*, 28 (23) 1565 (1988)
- 2) Amano, O. and Utsugi, S.: *Polym. Eng. Sci.*, 29 (3) 171 (1989)
- 3) Amano, O. and Utsugi, S.: *Polym. Eng. Sci.*, 30 (7) 385 (1990)
- 4) 横井秀俊, 岩崎龍一, 平野彰士, 鈴木謙克, 坂井秀敏: 成形加工 91, 15 (1991)
- 5) 多田幸生, 松本隆一, 岡本 勝, 外川一郎: 機械学会論文集, 57 (539) 307 (1991)
- 6) 赤坂則之, 高津戸康弘, 下平勝義, 石川紘一: 三菱重工技報, 27 (2) 119 (1990)