プラスチック成形工程におけるオンライン計測管理システムの設計 (1)*

小池昌義** 田中健一** 鴨下隆志** 矢野 宏**

Designing of Online-Measurement Control System
in Plastic Injection Molding Process (1)

Masayoshi KOIKE, Ken-ichi TANAKA, Takashi KAMOSHITA and Hiroshi YANO

Investigation is performed on basic concepts of online-measurement control system. Molding experiment including online-measurement and computer simulation on forecasting and controlling system in a plastic molding process are carried out. Online-measurement control system in this process is discussed. Simulation shows possibility of reducing product error by forecasting and controlling the process using online-measurement values on plural products. It is also necessary to arrange the controlling system depending on process variation.

Key words: online-measurement, quality control, measurement control, injection molding, process control, process forecast

1. はじめに

製品の品質向上（品質特性のばらつきの減少）のために、原則的には製品設計段階、工程設計段階でのオフライン品質管理¹⁾が重要であるが、企業の現実からいえば、製造工程の管理方式を定め、オンライン計測により工程の変動を的確にとらえ、制御するというオンライン品質管理²⁾を行うことがより重要視されている。しかし、現実に行われているオンライン計測はいわゆる管理図的な品質管理が中心で、計測の周期、工程へのアクションなどの方法論は必ずしも十分とは言えない。

ここで提案するオンライン計測管理とは、製品の品質特性の代用特性を用いて、製造工程中で直接製品を計測し、工程変動をとらえ、目標値に合わせるように予測的に制御する方法である。このようなシステムの設計のために、① それにふさわしいオンライン計測方法の開発、② このシステムの精度を確保するための工程における管理方法の設計、③ 工程の条件特性を用いて予測的に製品の特性を目標値に合致させる予測・制御方法の設計が必要である。また、これら設計されたシステムは経済的にも最適なものではない。

本研究は、プラスチック成形工程の管理を例にとり、実際の工程における②のオンライン管理システムの設計を実施するなかで、オンライン計測管理の考え方の適用上の問題点について検討を加えたものである。すなわち、オンライン計測を含めた射出成形実験を行い、更に、それにより得られた工程変動のデータを基に、③の予測・制御の考え方をシミュレーションにより検討した。

2. オンライン計測管理の考え方

オンライン品質管理は、製造工程において品質特性のばらつきを減少させるための直接的な活動である。オンライン計測管理はオンライン品質管理の中心に位置し、工程の予測を通して工程の管理・制御と密接に結びつき、従来のような製品個々をアクションの対象とした検査とは根本的に異なる³⁾。すなわち、オンライン計測では、ある時間間隔で工程中において製造直後の製品の計測を行い、得られたデータにより次の計測時点までの工程の状態を予測する。製品の特性が目標値から大きくはずれる可能性が予測される場合には、製品の特性を意図的に変化させるための信号因子を操作し、ある値に設定することにより、目標値に合わせるための制御を行う。既にオフライン段階でのパラメータ設計等により工程変動が小さくなる最適工程条件が選ばれている⁴⁾が、それでも調整しきれない変動を小さくするために、また、予測できない条件変化に

* 原稿受付 昭和61年12月24日。昭和60年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和60年10月14日）にて発表

** 正会員 計量研究所（つくば市梅園1-1-4）

よる製品の特性の変化に対応するため、工程の制御が行われる。

オンライン計測管理システムを有効に機能させるためには次の条件が必要である。

- ① 計測特性の選択
- ② 計測特性の目標値と管理限界の設定
- ③ 信号因子の選択
- ④ 計測方法の選択
- ⑤ 計測方法の校正間隔、校正方法の設定
- ⑥ 工程の計測間隔、制御間隔の設定
- ⑦ 工程の予測方法と予測式の設定
- ⑧ 計測特性の修正量を求める方法の設定
- ⑨ 信号因子の操作量を求める方法の設定
- ⑩ 信号因子の操作方法の設定

① から ③ の製品にかかわる問題はオフライン品質管理段階において決定される事項である。工程において計測し管理する特性は必ずしも品質特性であるとは限らない。

④ の計測方法としては、迅速性、環境条件に対する頑健性、測定範囲が狭くても高感度であること、等が必要であり、⑤ の計測方法の管理方法及び計測誤差について検討しておくことが重要である。

⑥ から ⑩ は、工程の予測・制御に直接かかわるものであり、工程変動の状況に合わせて決められる。⑥ は、工程変動の周期分析により最適間隔が決定される。⑦～⑩ については、4.1 節で詳しく検討する。

3. モデルとした工程変動の実験（成形実験）

3.1 実験計画

オンライン管理の有効性を検討するため、成形実験を行い、オンライン計測及び工程変動のデータを得た。使用した成形機は山城・津上製横型射出成形機 SS-5 である。成形品は厚さ 2 mm、直径 14 mm の歯車で、ポリアセタール樹脂製である。成形品に影響があると思われる成形条件のうち、次の因子と水準を選んだ。

① 金型温度（設定）	40	60	80	℃
② 射出圧力（ゲージ圧）	30	40	50	kgf/cm ²
③ 加熱筒温度（設定）	185	190	200	℃
④ 射出速度	低	中	高	

各因子の水準値は、経験的な標準値を第 2 水準とし、可能な限りでその前後の変化を与え、第 1、第 3 水準値とした。これらの因子を直交表 L_9 に割り付け⁹⁾、9 通りの条件の組合せ（実験 No. 1～9）で成形を行った。これら 9 通りの条件は、現実に行われる成形加工の範囲を覆っていると思われる。なお、予備解析の結果、最適と思われる条件の組合せでの確認実験（実験 No.

10）もあわせて行った。成形のサイクルタイムは約 8 s、各実験では 800 ショット、約 2 h の成形である。

本実験においては、計測特性として成形品の重量を採用した。これは重量が最適な特性であるからではなく、計測が容易で、オンライン計測の研究を進めやすく、また、この段階でシステムを検討し、問題の所在を明らかにするには問題はないと判断したためである。成形品の重量（約 250 mg）の成形による変動はかなり小さくなると予測されたため、最小目盛 0.01 mg、ひょう量 30 g の Mettler 社製電子天びんにより測定した。工程の変動を検出し、直ちに工程の管理に利用するため、成形機の近傍に電子天びんを設置し測定を行った。成形機の振動、成形直後の成形品の温度により、電子天びんのドリフト、感度の変化等が考えられるので、型開き後 20～30 s での製品の測定後、ゼロ点、標準分銅（約 500 mg）の測定、さらにゼロ点の測定をした。一連の測定の時間を考慮し、製品の測定間隔を 20 ショットとした。さらに、工程の細かい時間的変動の解析を行うため、1 ショットおきの成形品を成形順に保管し、通常成形品が安定するといわれている 48 h 以上後に、重量の測定を行った。

3.2 成形実験の結果

3.2.1 オンライン計測の有効性

オンライン計測器の校正方法としては、一般に、定点及び必要に応じて感度校正が行われる。工程変動を知るためには、ほぼ一定量の製品の微小量の変化を検出できればよく、微小量への感度校正の影響は小さいため、現場標準による定点校正だけで十分な場合が多い。変化量が大きく感度校正が必要な場合には、最低 2 個の標準の測定値により感度を修正しながら測定する。

オンライン測定中の、ゼロ点ドリフト及びゼロ点校正後の標準分銅の測定値の例を図 1 に示す。ゼロ点はマイナス方向にドリフトしており、ゼロ点校正または定点校正が測定の度に必要であることが示されている。分銅測定データの分散分析の結果、毎回ゼロ点校正した測定値のばらつきは標準偏差で 0.01～0.03 mg であった。これに相当する感度の変化分は 1 に対し 6/100 000 以下であり、また、時間に対する傾向性もなく、この実験程度の短時間では感度校正の必要はないことが分かった⁹⁾。

成形品が熱を持っている状態での測定が、製品の変動をとらえていることを確認するため、成形後 48 h 以上後の成形品の重量測定の結果と、オンラインでの測定結果とを比較した。図 2 は両者の測定値を時間（成形ショット数）に対してプロットしたものである。平

Fig. 1 Example of variation in offset and zero drift of the balance during the process

Fig. 2 Comparison of variation in weight measured in online and afterwards (Exp. No. 10)

均値に 0.2~0.4 mg の差があるが、これは、成形品放置中に、成形品が水分を吸収し重量が増加するために生じると考えられる。一方、製品相互の変動については、両者の測定値は同じような動きを示しており、対応が取れていることが分かる。また、回帰分析をしたところ、回帰項は高度に有意で、非常によい直線関係にあり、オンライン測定値から安定後の重量の予測は可能であることが分かった。

3.2.2 工程変動と周期分析

図 3 は、成形順に保管しておいた 1 ショットおきの成形品の重量の変動を工程変動と考え、時間に対してプロットしたものである。代表的な例のみを図示したが、工程変動の特徴により分類すると、

- ケース I : ドリフトのほとんどない場合 (No. 1)
- ケース II : 初期のドリフトに引き続き傾斜は小さいながら重量が小さくなる場合 (No. 2, 3)
- ケース III : 成形開始直後にドリフトがあり次第に落ち着いて重量が安定してくる場合 (No. 4~10)

の 3 つの場合に分けられる。いずれの場合でも、ショッ

Fig. 3 Typical examples of variation in product weight
Numbers in figures denote experimental Nos.

ト間のばらつきは大きい。また、III の場合でも、後半のデータには長い周期の緩やかなうねりが見られる。自己相関による検討の結果、初期のドリフト部分を除きショット間の変動に前後の相関はなく、ランダムであった。また、図 3 の実験 No. 4 に見られる、突然 1 つだけ重量の小さい製品が出来るというように、重量が大きく変化する例が少数ながら見られた。

工程変動を定量的に調べ、制御間隔を決めるために、周期分析⁷⁾を行った。初期のドリフトが常に存在するのであれば、制御の立場からは、初期段階では制御間隔を短くし、工程が落ち着くに従って次第に間隔を広げていくことができる。長時間成形する場合には、工程が落ち着き緩やかな変動をする部分が、初期ドリフトの部分より重要であると考え、全データのうち緩やかな変動をする後半の 256 データ (512 ショットに相当) を対象に、 2^n 個の単位に分割する周期分析のための分散分析を行った。表 1 に分散分析表の例を示す。分散分析により得られる周期成分がステップ的に大き

Table 1 Examples of analysis of variance of product weight for periodical analysis

Number of unit (shot)	Degree of freedom	Variance (1/100 mg) ²	
		No. 2	No. 4
256	1	11 622.19	389.08
128	2	3 328.17	75.25
64	4	781.99	190.37
32	8	262.10	66.66
16	16	187.79	62.52
8	32	95.70	45.69
4	64	41.32	54.58
2	128	41.38	44.83

くなる前の時間間隔が最適制御間隔となる。最適制御間隔は実験 No. ごとに若干異なるが、データ 16 個 (32 ショットに相当) を次の実験のための共通的な制御間隔として選んだ。

4. 予測・制御のシミュレーション実験

4.1 予測・制御の考え方

予測・制御のための工程稼動時の手続きを図 4 にまとめた。図 4 の各ステップにおいて、予測・制御の信頼性を高めるための方法を検討した。

ステップ I：測定値の信頼性を高めるために、測定のサンプリング数を増し、その平均値を測定値 x とする。但し、数を大きくすると制御遅れによる誤差を生じる。

ステップ II：オフライン段階で求めておいた予測式を使い、工程稼動時に工程平均 y の予測を行い、制御間隔内の変動を考慮に入れる。予測式を使わない場合は、従来の制御で考えられているように予測工程

平均値＝測定値、つまり $y=x$ の予測が行われていると考える。

ステップ III：工程のハンチングを起こさないようにするため、予測の誤差を考慮した修正量の決定方法である割引係数法²⁾を適用する。一般に、予測の誤差分散を V_e 、 y の目標値 x_0 からの差を $\Delta y = y - x_0$ とすれば、

$$F_0 = (\Delta y)^2 / V_e$$

とおいた時に、割引係数 β を、

$$\beta = \begin{cases} 0 & F_0 \leq 1 \text{ の時} \\ 1 - 1/F_0 & F_0 > 1 \text{ の時} \end{cases}$$

として、計測特性での修正量を $z = \beta \cdot \Delta y$ とする。割引係数法により、実際の修正量は小さめになる。これを適用しない場合は、 $z = \Delta y$ となる。

ステップ IV：計測特性での修正量 z から信号因子の実際の操作量 w を決めるための変換式 $g(z)$ の信頼性を上げるには、工程稼動前の実験を十分に行っておくことが必要である。

ステップ V：信号因子 (例えば射出圧力) の値を実際に変える操作を行う。人間に起因する設定誤差等は、条件設定装置でのデジタル値による設定により避けられるが、装置の設定誤差を評価しておくことが必要である。

4.2 シミュレーションの実験計画

予測・制御の効果及び上で述べたステップ I～III の方法の効果を調べるために、成形実験のデータを利用して、計算機によるシミュレーション実験を行った。

実験によりその効果を調べたい因子として、ステップ I での予測に利用するオンライン測定のサンプリング数の違い (1 個、2 個、4 個の 3 水準) 及び、ステップ II, III での予測式、割引係数の適用の有無を取りあげた。

成形実験により得られた直交表 L_9 と確認実験の計 10 通りの安定後の成形品重量の変動を工程変動のデータ例として利用した。工程変動例は標示因子であり、その主効果は誤差とは別に扱う必要がある。また、周期分析により得られた最適制御間隔は 32 ショットとなるので、32 ショットごとに測定サンプリングするが、測定サンプリングのスタートのショット位置を変えて計算を行った。スタートショット位置の因子は、誤差因子である。

予測式として、32 ショットおきの成形品の重量測定値の目標値からの差 Δx を独立変数、その後 32 ショット間の成形品重量の平均値の目標値からの差 Δy を従属変数とする一次回帰式

Fig. 4 Procedure of forecasting and controlling the process

Fig. 5 Effects of controlling the process on the product variance in weight
Numbers in figure denote experiment Nos.
 V_{T1} ; total variance without control, V_{T2} ; total variance with control, V_w ;
variance within control interval

を、実際のデータから求めた。サンプリング数が複数の場合、連続した成形品の平均値を測定値とした。予測式を求めるための回帰分析には、初期 14 個を除いた 384 個 (768 ショット分に相当) のデータを用いた。全体的に変動幅の小さい実験 No. 1 の場合を除いて、残差に対し回帰項の有意性の度合は高かった。

割引係数の計算に必要な予測の誤差分散 V_e としては、予測式を使う場合には予測回帰式の残差の分散、また、予測式を使わない場合 ($\Delta y = \Delta x$) には、制御間隔内の重量のばらつきを表す誤差分散 V_w を使用した。

予測・制御の適用範囲として、(A) 初期のドリフトを含めたほぼ全データ (736 ショット分)、(B) 初期のドリフトを除いた後半のデータ (512 ショット分) の 2 通りをとった。これは、工程の変動の全体的な傾向の違いによる制御の効果の違いをみるためのものである。

オンライン計測には時間遅れがなく、計測サンプリングした次の製品から制御がかけられ、その後の製品は次の制御までの間、その制御量だけ修正されて生産されると仮定した。工程のばらつきは、目標値からの偏差の全変動の分散 V_T の SN 比

$$\eta = -10 \log V_T$$

により評価した。計算時間は短く、また、因子の数が少ないことからすべての組合せについて計算した。

4.3 シミュレーション実験の結果

図 5 に、適用範囲 (A)、(B) の場合の制御の効果を示す。制御をしない時とした時の全変動の分散 V_{T1} 、 V_{T2} 、及び、周期内の分散 V_w を各実験 No. ごとに図示

した。 V_{T1} と V_{T2} の差が制御の効果を示し、また、 V_{T1} と V_w との差が、制御前の工程の緩やかなうねりの分散を表している。適用範囲 (A)、(B) いずれの場合も、実験 No. 1, 4, 5, 10 において、制御の効果が小さい。これらは全分散のうち周期内の分散成分 V_w の占める割合が高く、緩やかなうねり成分が小さいものである。緩やかなうねりの分散が大きいほかの場合には、制御の効果は大きく、制御によりばらつきが小さくなっている。

表 2 の分散分析表及び図 6 に、シミュレーション実験で取り上げた要因の、全変動 V_T の SN 比に対する効果を示す。予測式を適用した場合、また、サンプリング数の多い場合、ばらつきが小さくなることが確認された。しかし、サンプリング数を 2 倍にしても、分散は 1/2 になるわけではなく、分散の加法性からのずれを生じている。実際にオンラインの測定計画を立てるとき、改善効果として生じる製品のばらつきによる損失の減少と測定コストの増加とのバランスを取る必要がある。

割引係数については、初期ドリフトのある適用範囲 (A) の場合、全体として、割引係数を適用しない方がよい。適用範囲 (B) では、 Y (予測式) との交互作用が大きく、特に、予測式の有無によりその傾向は逆になった。これは、高次の変動の大きさやドリフトによ

Table 2 Analysis of variance of SN ratio representing total variance of product weight

Source	Degree of freedom	Variance dB^2	
		Case (A)	Case (B)
Forecasting (Y)	1	69.25	78.54
Shrinkage factor (W)	1	31.52	0.23
Sampling number (H)	2	44.66	46.11
Interaction $Y \times W$	1	2.39	18.98
Interaction $Y \times H$	2	0.06	14.04
Interaction $W \times H$	2	2.08	3.82
Process example (L)	9	522.51	951.19
Interaction $L \times Y$	9	0.66	4.57
Interaction $L \times W$	9	0.63	3.90
Error e_4	81	0.45	0.85
Error e_5	840	0.79	1.00

Fig. 6 Effects of the factors on the total variance of product weight

り割引係数の効果が変わることを示している。

範囲 (A) のように一方向のドリフトがある場合、割引係数のために、ドリフト量に対し修正量が小さくなり過ぎ、割引係数を適用しない場合に比べ、目標値からの差は小さくならない。範囲 (B) では、割引係数は単独では有効であるが、予測式も適用した場合、その 1 次係数が 1 より小さい上に、さらに割引係数を掛けるため修正量が小さくなり過ぎて修正しきれないため、交互作用が生じたと考えられる。割引係数の特徴から、±に変化するうねりのように以後の工程の変化が必ずしも一定方向ではない場合には、割引係数法を適用することが有効である。

実際の製品の誤差には、シミュレーションで取り上げたもののほか、制御遅れの誤差、信号因子の制御量への変換式の誤差、現実の作業、操作のばらつき等が加わる。

5. ま と め

オンライン計測管理システムを機能させるための基本的条件として、計測システムの管理、計測間隔、予測方法の 3 項目を立て、プラスチック成形工程をモデルとした検討を行った。さらに、成形実験により得られた工程変動のデータを用いた工程の予測・制御方式のシミュレーション実験を行い、次の結果を得た。

- (1) 成形品の重量により成形工程の変動をとらえたところ、工程変動は、一方向のドリフトがなく緩やかなうねりだけの場合、初期ドリフトに続き緩やかなうねりのある場合、緩やかなドリフトが残る場合の 3 つの場合に分かれ、それぞれに制御

条件の效果に違いを生じる。

- (2) 成形工程の制御において、オンライン計測のサンプリング数を増し測定値の信頼性を上げることににより、成形品のばらつきを減らすことができるが、サンプリング数に反比例して分散が小さくなるわけではない。
- (3) 工程平均の予測を行うことは、製品のばらつきを減らすために有効である。
- (4) 割引係数法は、一方向にドリフトする工程には有効ではないが、うねりのある工程に対しては有効である。

成形工程においては、オンライン計

測する時点で製品が熱を持ち、まだ安定していないこと、成形条件によって寸法などいくつかの特性が関連しながら変化すること等の困難さがあり、このシステムを実際に適用するためには、オンライン計測方法の詳しい検討が必要である。

製品の計測によるオンライン計測管理の考え方は、プラスチック成形以外の工程においても有効であると考えられ、そのためのシステムの設計には工程変動の検討、オンライン計測方法の検討が重要な役割を果たす。

本研究をまとめるに当たり、貴重なご意見を頂いた田口玄一博士に感謝する。また、本実験を実施するに当たりご協力頂いた山城精機製作所(株)の杉山昭氏及び黒岩都香子嬢に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 田口玄一：技術部門、設計部門のオフライン品質管理、日本規格協会 (1982)。
- 2) 田口玄一：製造部門のオンライン品質管理、日本規格協会 (1979)。
- 3) 矢野 宏：計測管理の実際、工業調査会 (1986)。
- 4) 田中健一ほか：工程管理における工程と制御条件の最適化の方法、精密工学会誌、53, 10 (1987) 1602。
- 5) 田口玄一：第 3 版実験計画法、丸善 (1977)。
- 6) 小池昌義、矢野 宏：直交表を利用した電子天秤の環境試験、第 53 回日本分析化学会有機微量分析研究懇談会、第 9 回計測自動制御学会質量・力計測部会合同シンポジウム講演要旨集 (1986) 44。
- 7) 矢野 宏、小池昌義、杉山 昭：成形加工におけるオンライン計測管理、計量管理、31, 11 (1982) 653。