

MTシステムによる射出成形品の均一充填性評価

—透過率による充填性の評価—

日大生産工(院) ○櫻井 基樹 日大生産工 大澤 紘一
(株)ツムラ 矢野 耕也 (株)山城精機製作所 徐 世中

1. はじめに

近年、技術革新による製品の急速な高精度化・多機能化・小型化に伴い、部品などで用いられる樹脂製品についても、一層の精密化が求められている。樹脂を用いた精密部品の代表としてマイクロレンズなどが挙げられる。それらの製造に用いられる精密成形技術では、 μm レベル以下の寸法に関する超精密加工の技術研究はされているが、樹脂の充填ムラなど内部についての評価技術に関する研究が課題とされている。品質工学の立場では、「射出成形の基本機能は、金型と相似の成形品を作ること即ち転写性である」という考えから、成形品の寸法による転写性の研究¹⁾などがこれまで行われているが、本研究では、光学製品など透明樹脂製品を想定し、その透過性を一種の濃度パターンとして捉え、光学透過性のばらつきを、直交表実験とマハラノビスの距離を用いたMTシステムを対応させることで、充填ムラについて検出力の高い精密な内部評価と制御を行うことを目的とした。また内部の充填性が良ければ、結果として高い寸法転写性が得られると考えた。

2. 射出成形における転写性のパラメータ設計

2.1. 実験方法

本研究では射出成形の機能を、金型への樹脂の均一充填すなわち均一に充填された樹脂は透過パターン²⁾のばらつきが小さいと考え、透明樹脂を用いて光の透過性の程度による評価を行った。実験は山城精機製作所(株)の縦型射出成形機(図1)を使用し、樹脂は高透明素材としてポピュラーなエンジニアリング・プラスチックであるポリカーボネートを用いて成形を行った。金型については部位ごとに厚みが異なるS字型のもの(図2)を使い、このような複雑な形状の成形品で精度の高い評価ができれば、他の形状についても評価が可能

であると考えた。成形品は2mm部、3mm部、4mm部の各部位ごとに切断し(図3)、光を均一に面発光させる導光板の上に置き、簡易的な装置(図4)で成形品をデジタルカメラで撮影し、得られた画像データをRGB値に変換し、256階調の濃度データを透過性の代用とし、各部位における望目特性のSN比・感度及び全体のSN比・感度を算出して樹脂の均一充填性を評価した。ここでSN比は、試験片表面の透過ばらつきの改善の尺度となる。



図1. 縦型射出成形機

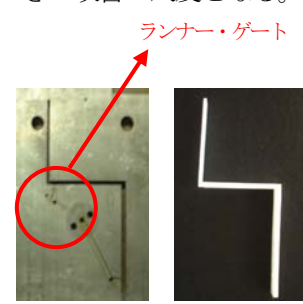


図2. 金型及び成形品



図3. 成形品切断図



図4. 実験装置

2.2. 制御因子

射出成形工程は、以下(1)～(12)の動作を一工程として成形を行う。

(1)型締め高速、(2)型締め低速、(3)主圧、(4)射出充填、(5)一次保圧、(6)二次保圧、(7)スクリー回転、(8)スクリー後退、(9)冷却、(10)型開き低速、(11)型開き高速、(12)突き出し

この工程において、成形品に影響を与える成形条件の内部的な要因として、以下の項目を制御因子とした(表1)。また、現行条件を第2水準とした。

表 1. 制御因子

A:スクリュー形状	形状1	形状2	
B:金型温度	低	現行	高
C:加熱筒温度	低	現行	高
D:スクリュー速度	遅	現行	速
E:射出圧力	小	現行	大
F:射出速度	遅	現行	速
G:冷却時間	短	現行	長

2.3. 誤差因子

プラスチック加工に付随する、温度変化に伴う熱膨張による寸法変化に対するロバストネス性を高めるために、成形後に約 240℃の成形品を、約 0℃の氷水の容器の中に 1 分間入れることで急激な温度変化を与えた。樹脂成型時に発生するばらつきを減衰させる目的で、ばらつき要因を意図的に系内に加えるのが誤差因子の役割である。

3. 実験結果

3.1. 実験データの解析

本実験で得られるデータ形式を図 5 に示す。また、望目特性の SN 比による均一充填性の解析式を以下に示す。望目特性の SN 比は感度が求められるため、透過ばらつきに加えて透過度が評価可能となる。

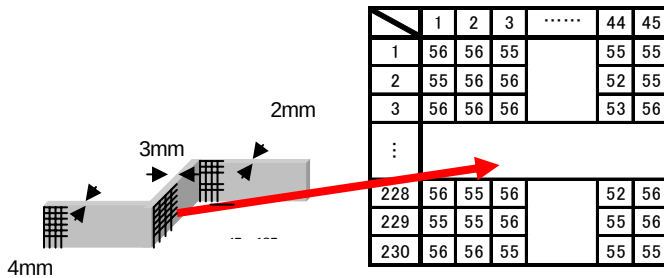


図 5. 充填均一性解析のデータ形式

全 2 乗和

$$S_T = y_{11}^2 + y_{12}^2 + \dots + y_{jk}^2 \dots \dots \dots (1)$$

(1)

一般平均 S_m

$$S_m = \frac{(y_{11} + y_{12} + \dots + y_{jk})^2}{f} \dots \dots \dots (2)$$

誤差変動 S_e

$$S_e = (y_{11} - \bar{y})^2 + (y_{12} - \bar{y})^2 + \dots + (y_{jk} - \bar{y})^2$$

$$= S_T - S_m \dots \dots \dots (3)$$

誤差分散 V_e

$$V_e = \frac{S_e}{f-1} \dots \dots \dots (4)$$

(4)

SN 比 η

$$\eta = 10 \times \log \frac{S_m - V_e}{f} \dots \dots \dots (5)$$

感度 S

$$S = 10 \times \log \frac{S_m - V_e}{f} \dots \dots \dots (6)$$

3. 2.均一充填性評価の要因効果図

2mm 部、3mm 部、4mm 部の厚さの異なる部位、また、全体の SN 比、感度の要因効果図の中から 2mm 部と全体の要因効果図を図 6,7 に示す。

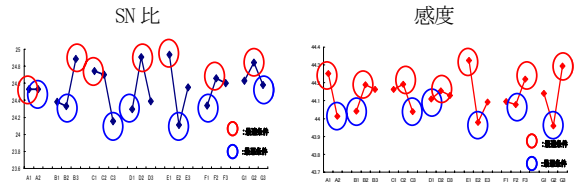


図 6. 2mm 部(R) の SN 比・感度の要因効果図

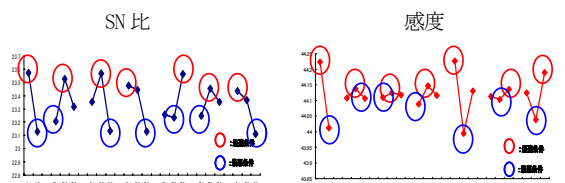


図 7. 全体(R) の SN 比・感度の要因効果図

2mm、3mm、4mm の厚さ部位ごとの SN 比・感度の要因効果図から求めた最適・最悪条件を表 2 に示す。

表 2. SN 比・感度の最適・最悪条件.

SN 比	2mm	最適条件	A1 B3 C1 D2 E1 F2 G2
		最悪条件	A2 B2 C3 D1 E2 F1 G3
	3mm	最適条件	A1 B2 C2 D1 E3 F2 G1
		最悪条件	A2 B3 C1 D2 E1 F1 G3
	4mm	最適条件	A1 B2 C3 D2 E2 F1 G1
		最悪条件	A2 B3 C2 D1 E1 F3 G3
感度	全体	最適条件	A1 B2 C2 D1 E3 F2 G1
		最悪条件	A2 B1 C3 D3 E2 F1 G3
	2mm	最適条件	A1 B2 C2 D2 E1 F3 G3
		最悪条件	A2 B1 C3 D1 E2 F2 G2
	3mm	最適条件	A1 B2 C1 D3 E1 F2 G3
		最悪条件	A2 B3 C3 D2 E2 F3 G2
	4mm	最適条件	A1 B1 C3 D2 E1 F1 G3
		最悪条件	A2 B2 C1 D1 E2 F2 G2
	全体	最適条件	A1 B2 C2 D2 E1 F3 G3
		最悪条件	A2 B3 C1 D1 E2 F2 G2

要因効果図からは、厚さの異なる部位によって効果のある因子が異なるということが確認できる。また、解析結果からは、ゲート付近の 2mm 部の SN 比が他の部位と比較して高く、3mm、4mm 部とゲート位置から遠くなるにつれ、樹脂の流動性が悪くなり、ひずみなどが生じ充填性が悪くなっていることがわかる。ここで、各部位及び全体における SN 比と感度の最適条件と最悪条件との利得の推定値を表 3 に示す。

表 3. 各部位における SN 比・感度の推定値(db)

	2mm部		3mm部		4mm部		全体	
	SN比	感度	SN比	感度	SN比	感度	SN比	感度
最適条件	26.18	44.84	24.51	44.47	25.94	44.64	24.53	44.48
最悪条件	24.75	43.78	23.05	43.83	24.89	43.93	23.66	43.85
利得	1.43	1.06	1.45	0.65	1.05	0.71	0.87	0.63

表 2 より得られた最適・最悪条件での推定値に対する利得が追実験で再現されれば、パラメータ設計の信頼性が確認可能といえる。

しかしながら、厚み全体で SN 比と感度を見た場合、透過性(透過濃度)を特性とした評価のみでは、どちらも 1(db)を割り込んでいる。条件差が最大となる最悪条件と最適条件の差で 1(db)以下ということは、他の条件との比較や、試験片の厚みや部位による差に関する検出精度が期待できないケースも考えられる。そこで、MT システムと呼ばれる、メッシュの配列規則に注目した解析を次章で試みた。

4. MT システムによる解析

4.1 MT システムの位置づけ

ここまでは、各セルにおける濃度データに対し、SN比を解析することでばらつき改善を行ったが、より詳細に部位の評価を行うには、濃度のパターン評価が必要となる。SN比による評価は、メッシュ間のばらつきを求めていることになるが、メッシュ間の縦横濃度の関係のばらつきまでは求められない。そこで、濃度データの数列パターンのばらつきを、相関行列を利用したマハラノビスの距離(以下 MD²距離)を用いた MT システムによる解析を行い、SN比との対応関係を調べると共に、より検出力の高い解析により充填性評価を行った。RGB 値については要因効果図からそれぞれ同じ傾向があることが確認できたことから、感度が高い G の値で解析を行う。

4.2 単位空間の選定

MT システムにおける距離は、基準パターンである単位空間からの距離が大きくなるにつれて大きくなるベクトル量である。またパターン単位空間は一般的に、バラツキの少ない理想状態のデータ集団とする。本研究においては、2mm 部、3mm 部、4mm 部それぞれについて L18 実験の結果データから最も SN 比が高かったもの、即ち最も透明性のある成形品を単位空間とした。単位空間データの例を以下の表 4 に示す。

表 4. 単位空間データ

	1	2		n
1	x ₁₁	x ₁₂		x _{1n}
2	x ₂₁	x ₂₂		x _{2n}
3	x ₃₁	x ₃₂		x _{3n}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
k	x _{k1}	x _{k2}		x _{kn}

4.2. 正常品(良品)と異常品(外観不良品)の MD² 距離

正常品(単位空間データ) に対し、外観不良の成形品(図. 8) のデータの MD²距離を算出し、識別が可能であるかを調べた。なお、距離は次式(7)により求められる。

$$MD^2 = \frac{1}{k} \sum_{ij=1}^k a_{ij} \left(\frac{x_i - m_i}{\sigma_i} \right) \times \left(\frac{x_j - m_j}{\sigma_j} \right) \dots (7)$$

MD²距離の平均と最大値と最小値の差を以下に示す(表. 5)。また、視覚的に掴みやすいよう MD²距離とデータ数のヒストグラムを以下に示す(図. 9)。



正常品 外観不良品

図 8. 成形品(3mm 部)

表 5. 良品と不良品の MD² 距離

MD ² 距離		良品	不良品
	平均	1	12.62
	MAX-MIN	3.69	81.75

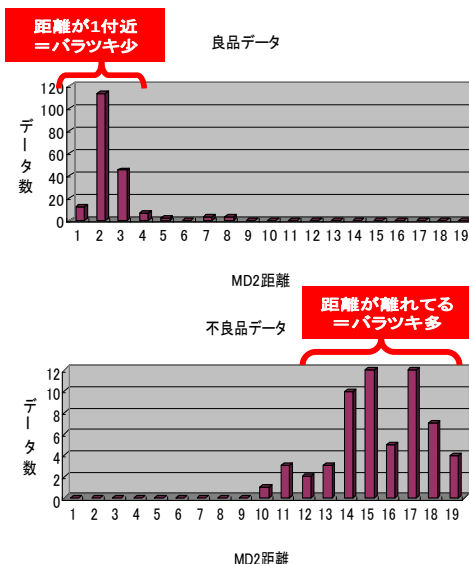
図 9. MD²距離とデータ数のヒストグラム

表 5 及び図 9 の解析結果からもわかるように視覚的に良品と不良品との見分けがつくものに対しては明確な識別が可能であるが、距離平均でも 12 倍以上の差があり、距離による透過性の濃度差でも 27 倍近い差が存在し、距離による比

較は、SN比よりも検出力が高いことを示している。また不良品に関して、充填ムラが存在する箇所を検出するために、項目として使用した45列の中からパターンのバラツキが多い列を探索する手法として、2ⁿ系直交表を適用した項目診断の解析を行った結果を以下に示す(図. 10)。

これは、列の適用の有無を機械的に2水準系直交表に割り当てて、各列の距離の偏差をみることで、ばらつきの存在する列の要因効果を望大特性のSN比の水準差として表現したものである。つまり、テストピースのメッシュである45列についてばらつきが偏在する列を求めていることになる。

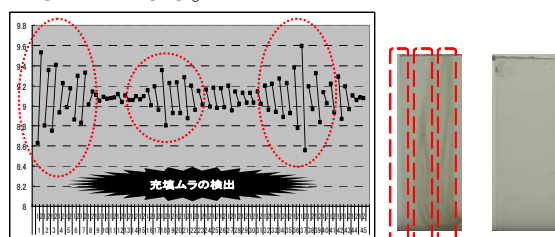


図 10. 項目診断結果

図 10 から、成形品の中の透過ばらつきの偏在が、項目のどの部分にパターンのバラツキがあるかということが検出可能である。この不良品の場合は主に3つの箇所で充填ムラを確認することができる。

4.3. SN比が同じ場合のMD²距離での比較

SN比とMD²距離での解析における検出力の決定的な違いは、SN比が測定値(透過度)自体のばらつきを独立したデータとして求めているのに対し、MD²距離は透過ばらつきの位置関係のパターン、すなわち測定値同士の相互の関係を考慮してばらつきを求めているということである。ここで、SN比はほぼ同じで、視覚的に見ても優劣の判別をつけることができない2つの成形品A・B(図 11)について、先程と同様にそれぞれのMD²距離を計算したもの以下に示す(表 6)。

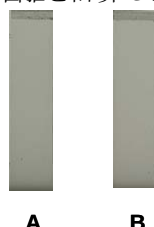


図 11. SN 比が同じ成形品

表 6 で求めたMD²距離からA・Bの成形品の優劣を数字で求めることができた。つまりAはBに対し、SN比はほぼ同じであるが、距離平均で1.3倍、最大距離差で2.4倍異なるといえる。また、

表 6. SN比が同じ成形品のMD²距離

		A	B
MD ² 距離	平均	3.05	2.4
	MAX-MIN	64.47	26.51

1 試験片ごとに得られるMD²距離のヒストグラム(図 12)、直交表L₆₄による項目選択(図 13)から、視覚的により明確に透過性の優劣を判断し、かつ充填ムラの箇所についても検出と同定が可能であると言える。

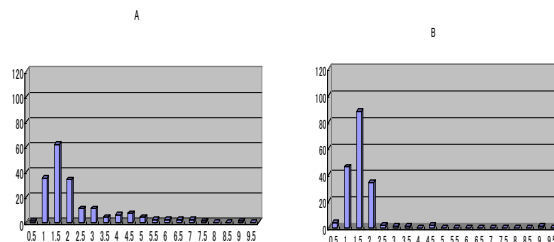


図 12. MD²距離とデータ数のヒストグラム

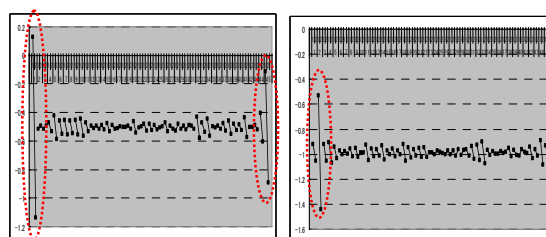


図 13. 項目診断結果

4.4 距離を使用した要因効果の探索

4.2 及び 4.3 では、MD²距離を適用することで、望目特性のSN比よりも高い検出力が得られることが明らかとなった。ただしばらつきの要因は試験片を分割したメッシュ内の位置の推定であるので、原因系に遡ることによって射出成形の条件の制御・管理ならびに改善を行うことが理想的である。そこで、2 章で行った直交表を用いた要因解析について、距離を特性として行うことで、望目特性のSN比よりもさらに高い検出力による射出成型の要因効果の探索と、成形条件の制御が可能となる。

5. 今後の研究

MT システムを用いることで、視覚だけでは優劣がつけ難いものや、SN 比が同じ対象の判別が可能であることが明らかとなった。今回はデータ解析の関係上、画像データを圧縮したが、より高精度が求められるものに対しては画像数を増やすことで、より高い検出力の評価が可能となり、樹脂の透過性の改善が期待できる。

参考文献

1. 山村英記他、「薄肉 S 字型射出成形品の最適化研究」、品質工学、Vol. 15、No. 4 (2007)
2. 本橋勝美他、「MT システムによるレンズ性能ばらつきの原因探求」、第 14 回品質工学研究発表大会論文集：P30～33 (2006)