成形品の特性値と信頼性

矢野 宏

Hiroshi Yano, 計量研究所

1. はじめに

まず、「特性値とは何か」から検討する。特性という言葉は必ずしも技術用語とはいえないかも知れないが、ここでは製品に付与された目的あるいは働き（機能）に関連して定量化されるべきものとし、それを何らかの形で数量化したものを特性値とよぶことにする。したがって、特性値は製品の機能を適切に表現すべきものでなければならず、機能の程度を一般には性能とよぶことがある¹⁾。

特性の中でも、目的を直接的に表現するのが目的特性であり、その代用あるいは間接的表現を代用特性とよぶ。一般に計測器などにより測定可能な特性の大部分は代用特性である。代用特性は目的特性と密接に関係するものでなければならず、製品の改善効果などを表わすのに有効なものでなければならない。

筆者は、試験というのは定められた手順に従ってものの性質を調べることにしている。すなわち、試験そのものが適切とはいえなくても、他に方法がないとか、行なわないよりは行なった方が無難であるとか、あるいは行なわないと取引が成立しないとかいうのを含むのが試験である。これに対して評価というのは、試験の適切さとか妥当性を含めて判断する行為といえることができる。したがって、試験の適切さを評価し、その有効性を確認してから、実際の試験を行なうべきであるが、試験を通してしか判断ができないということと、製品が実際に社会に出ない限り、評価が適切であったかどうかには不明な部分が残る²⁾。このようなことから、特性、試験、評価の関連性を確認するための体系的な方法を、個々の専門技術とは区別して、計測管理工学と名付けている³⁾。

このようなことから、本稿ではプラスチックの特性の信頼性（寸法も含めて）を判断する方法についての

検討を行なうことにする。

2. 各局面における特性値の安定性

2-1. 寸法測定法

寸法測定の信頼性は高分子の特性を試験する上での基礎である。寸法測定法が不十分なら、それに関連する製品設計、金型設計、加工、機能の安定性など、判断を誤るだけでなく、寸法以外の強度的特性さえも信頼がおけなくなる。かつて石田らは、引張試験片の断面寸法を精密に測り、実際の引張強さと見掛けの引張強さに数%の差があることを明らかにした⁴⁾。精密な寸法計測器により、測定力を軽くすれば、成形品でも数 μm 以下の誤差で寸法を測ることは可能である⁵⁾。しかし、実際の工程あるいは成形現場では、こうした測定は可能ではなく、在来マイクロメータ、ダイヤルゲージを使う場合は、10 μm 以上の誤差は避けられないことが多い。

寸法測定の誤差は、計測器を標準で校正したときの誤差分散を $\sigma^2_{\text{校}}$ 、成形品を測定したときの誤差分散を $\sigma^2_{\text{成}}$ とすれば、総合された誤差の目安は、 $\sigma^2_{\text{校}} + \sigma^2_{\text{成}} = (3\mu\text{m})^2$ 、 $\sigma^2_{\text{成}} = (5\mu\text{m})^2$ とすれば、

$$\pm 2\sqrt{\sigma^2_{\text{校}} + \sigma^2_{\text{成}}} = \pm 2\sqrt{3^2 + 5^2} \\ = \pm 12\mu\text{m}$$

となる⁶⁾。一般にはこのような誤差を正しく求めるこ

矢野 宏 計量研究所 (305 茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4) 力学部長・工博

昭和30年東大工学部応用物理学科卒。31年工業技術院計量研究所入所、現在に至る。著書に「計測管理工学入門」工業調査会 (1984)、「計測管理の実際」工業調査会 (1986)。

とが少なく、測定 of 単純な繰返しのばらつきを誤差と勘違いしている場合が多い。

2-2. 成形加工における特性値の安定性

成形加工によって成形品が安定に成形できるということは、さまざまな意味をもっている。一般的には寸法のばらつきが少ないことが、現場の成形加工にとって重要であるという風に考えられているが、さらに重要なことは、成形加工条件が変化すると、プラスチックのさまざまな特性値が変化するということである。いわゆる収縮率というのも、形成品の形状と成形条件によって変化するから、単なる平板の収縮率というのは、目安以上の意味をもたない。また、成形品の検査は成形後 12-24 時間後に行なうなどといわれるが、実際には成形直後に寸法を測定して、予測的に成形品の制御を行なうことも必要である。したがって、成形加工条件による特性値の安定性については、次のような課題がある。(1) 成形加工における寸法の安定性、(2) 成形品の強度的特性、その他物性値の安定性、(3) 成形直後からの寸法変化の予測。これらの課題はすべて成形条件の関数であって、一義的には定まらないということが重要である。

寸法安定性については、(1) 寸法のばらつきが小さいこと、(2) 目標とする寸法に対してよく一致していること、(3) 真円度、そり、曲がり、ひけなどの形状誤差の小さいことなどが上げられる。これらを実現するための方法は必ずしも同一ではない⁷⁾。単に成形条件を変化させて、平均値を変化させるような方法では、十分な解決をあまり期待できない。解決のためには成形条件設定のためのパラメータ設計が有効である⁸⁾。

まず、安定性を実現するための選択的な成形条件(これを制御因子という)を直交表に割り付ける。通常、 L_{18} の直交表が用いられる。これに対して、安定性を妨害するような条件(これを誤差因子)と、寸法を目標値に合わせるために調整に使う条件(例えば射出圧力のようなもので、信号因子という)を組として、 L_8 、 L_9 の直交表、多元配置表などに割り付ける。さらにこれら二つの割り付け表を組み合わせ(これを直積という)、実験を実施する。計量研究所の計測数理研究室にはこのようなデータがかなり蓄積されている⁹⁾。

このような実験によって得られる安定性のデータは、データ自身の信頼性が高い。これをデータに頑健性あるいはロバストネスがあるという。

2-3. 環境変化に対する物性値の安定性

主として、光、温度、湿度を中心に、環境条件の変化は物性値に大きな影響を与えることはよく知られて

おり、材料、環境条件を意図的に変化させて、寸法変化を追及した研究では、計量研究所の材料計測研究室にかなりのデータが蓄積されている¹⁰⁾。これは主として工業技術院の耐久性の共同研究の一部として行なわれたもので、貴重なものであるが、この共同研究については、すでに指摘されていることであるが、材料が任意に集められていることが、データの限界になっているが、材料計測研究室のデータは比較的よい解析が行なわれている。日本産業技術振興協会において、評価方法の研究会が行なわれたがここで問題となったのは、企業規模では評価についての十分な研究ができず、公的な研究機関の協力が必要であるということであった。しかし、公的機関の研究と企業の要求のマッチングは必ずしもよくないことが明らかにされた¹¹⁾。これを改善するためには、データの価値とか信頼性について、社会全体の理解をいかに高めるかが大きな課題であるような気がする。新素材評価センターの設立は、このような研究の展開のきっかけを作るかも知れないが、研究方法に従来の域を脱していないのではないかと心配が残る。試験による研究でなく、評価の研究が行なわれることを期待する。

2-4. 時間的変化に対する安定性

時間的変化は上述の環境変化に相應するかも知れないが、長時間の時間的変化は短時間の促進試験とは必ずしも対応するとはいえないかも知れないし、常温のごくわずかの環境変化の集積が、材料の内的変化を引き起こす。このようなことに対する安定性あるいは促進試験に対する一つの考え方を、事例として後に示す。

3. 成形品の寸法の許容差設定

成形品に限らず適用可能な方法であるが、日本合成樹脂技術協会によって、『プラスチックの寸法許容差の決め方』JIS K 7109 (委員長: 田口玄一) が作成され、1986 年に発効した。この許容差は従来の安全係数に代わって、田口により提唱された誤差の損失関数の考え方に基づいている¹²⁾。成形品の使用者の段階における許容限界値 A_0 を仮定して、 A_0 をはずれた時に発生する損失を A_0 とする。これは LD 50 (生と死とが半々になる場合) の考え方に相應する。実際に A_0 を越えるかではなく、越えた時の損失を仮定すればよい。もし、組み立てメーカーにおける手直し損失あるいは成形加工メーカーにおける不良品の廃棄による損失を A とすれば、組み立てメーカーあるいは成形加工メーカーの許容差 Δ は、

$$\Delta = \sqrt{A/A_0} A_0$$

表 1 実験条件の割付け

(a) 制御因子

因子 列番 No.	添加 物の 有無	グレ ード	グレ ード 混合	再 生	樹脂 温度	型 温	射出 圧力	射出 速度
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

(b) 誤差因子

滞留時間: I₁ (10s), I₂ (200s)加熱処理: J₁ (前), J₂ (後)

因子 No.	滞留時間	加熱処理
1	1	1
2	1	2
3	2	1
4	2	2

である。

例えば、音響製品に使用しているプラスチック部品の場合、部品の寸法の許容差 $\Delta_0=0.15\text{ mm}$ を越えた時、音のひずみのために使用者の 50% が製品を修理すると仮定する。製品の修理料を 3,000 円、使用者が修理のために店頭へ搬入、搬出するための時間を 1 時間、時間損失を 3,000 円とすれば、使用者段階における平均損失は

$$A_0=3,000+3,000=6,000\text{円}$$

となる。組み立てメーカーにおいて、組み立てた後で不良品が発見された場合、部品代を 200 円 (購入原価)、手直しに要する時間を 5 分とすれば、時間損失を 3,000 円として、組み立てメーカーの平均損失 A は

$$A=200+3,000 \times 5/60=450\text{円}$$

と推定される。したがって、組み立てメーカーの Δ は

$$\Delta=\sqrt{\frac{450}{6,000}} \times 0.15=0.41\text{ mm}$$

表 2 引張試験片の幅を特性値とした精密累積法の分散分析表

要 因	自由度	変動	分散
B (グレード)	2	18.5514	9.2757
F (金型温度)	2	12.0056	6.0028
G (射出圧力)	2	21.9014	10.9570
e ₁ (1 次誤差)	12	8.0584	0.6715
J (加熱処理)	1	20.5444	20.5444
B (グレード) × J	2	0.5597	0.2799
C (グレード混合) × J	2	0.2514	0.1257
F (金型温度) × J	2	1.0722	0.5361
G (射出圧力) × J	2	0.5181	0.2590
e ₂ (2 次誤差)	44	1.8348	0.0417
ω (オメガ)	19	163.8639	8.6244
B (グレード) × ω	38	8.1153	0.2136
F (金型温度) × ω	38	8.9944	0.2367
G (射出圧力) × ω	38	7.7653	0.2043
e ₃ (3 次誤差)	228	12.7139	0.0558
J (加熱処理) × ω	19	6.0667	0.3193
B (グレード) × J × ω	38	9.4958	0.2499
D (再生) × J × ω	38	3.1500	0.0829
E (樹脂温度) × J × ω	38	3.2625	0.0859
F (金型温度) × J × ω	38	10.4833	0.2759
G (射出圧力) × J × ω	38	10.8708	0.2861
H (射出速度) × J × ω	38	4.4375	0.1168
e ₄ (4 次誤差)	760	18.6194	0.0245
T (合計)	1439	356.1972	

となる。成形加工メーカーの損失 $A=200\text{円}$ とすれば、成形加工メーカーの許容差は

$$\Delta=\frac{\sqrt{200}}{6,000} \times 0.15=0.027\text{ mm}$$

となる。

以上の過程で許容差が検討された場合、実際にこの許容差で成形品ができるとは限らない。許容差を設定する部品に対して、どの程度の精度で加工可能なのか、また、それらを判定するのに十分な測定能力があるのかを、すでに述べたパラメータ設計の方法などをを用いて検討することになっている。

4. 信頼性評価のための実験

信頼性の評価を効率よく行なう方法を研究するため、(株) 三菱瓦斯化学と協力して、以下のような実験を行なった¹³⁾。まず、制御因子を表 1 の L₁₈ の直交表に割付け、別に誤差因子をとって、直積法による成形実験を行なった。特に実際の成形現場ではしばしば利用される再生材を因子として取り上げた。誤差因子として取り上げた樹脂の加熱筒内での滞留時間は、樹脂の熱劣化を想定するものである。滞留時間を長くすれば熱劣化を起こすであろうと考え、成形品の特性

図1 射出圧力を変化させた時の試験片の幅の分布状態

が、滞留時間の短い条件との差の少ない材料、加工条件を選べば、その条件で作られた製品は、熱劣化に強いのではないかと考えた。ただし、滞留時間をどれほど長くすべきかという点では、メーカー側の安全を考えたため、結果的には短すぎたと思う。

工学の実験を行なう上で重要なことは、平均値の傾向とばらつきの傾向を、単なる混合ではなく、分離した上で同時的に評価することである。現在、アメリカでタグチ・メソッドといわれている SN 比の評価の方法は、スタンフォード研究所では concurrent (同時的) design ともよばれているが、平均値の傾向を S として、ばらつきの傾向を N として尺度をつくるものである¹⁴⁾。この考え方を述べるためには、紙面も不足しているが、この実験の誤差因子も不足しているので、ここでは引張試験片の幅の変化を例として、SN 比を省略してもなお、同じ結果の得られる精密累積法の解析結果について述べる¹⁵⁾。

精密累積法では、寸法のような計量値でも、1, 0 のような計数値に変換して、計数値の分散分析を行なうが、表2に分散分析の結果を示した。解析の過程を省略して、結果のみを述べる。表2では、誤差分散の大きさに比して効果の小さい要因は誤差分散にプールしてある。表の上段は平均値の変化の大きさの程度を表わしており、グレード、型温、圧力、加熱処理によって、平均値が変化したことを示す。また、加熱処理との交互作用が、グレード、グレード混合、型温、圧

力にあった。下段は条件によってばらつきの程度が異なることを示しており、材料、成形、加熱処理によってばらつきの傾向が異なることを示す。図1に例として射出圧力の結果を示した。射出圧力が低い方が、寸法のばらつきも経時変化も小さい可能性が高いことになる。それ以外の傾向を見ても、ばらつきの小さい試験料の方が、成形後の経時変化の小さい可能性が高く、材料の安定性、信頼性は以上のようなさまざまな条件によるばらつきの傾向から判断することが重要であることがわかる。

成形品の特性の安定性、信頼性の評価では、単なる試験データのばらつきではなく、材料や加工条件の選択により、他のさまざまな条件の影響によるばらつきが減衰することを明らかにすることが望ましい。

参 考 文 献

- 1) 矢野 宏：合成樹脂, 24, 10 (1978)
- 2) 矢野 宏：品質設計における計測 (3), 13, 7 (1985)
- 3) 矢野 宏：計測管理工学入門, 工業調査会 (1984)
- 4) 石田 一, 田中 稔, 矢野 宏：合成樹脂, 28, 2 (1982)
- 5) 福井, 矢野 宏：精密プラスチック金型と成形技術, 日刊工業新聞社 (1985)
- 6) 矢野 宏：プラスチックス, 35, 8 (1984)
- 7) 矢野 宏：計測管理の実践, 工業調査会 (1986)
- 8) 計量管理協会編：新製品開発におけるパラメータ設計, 日本規格協会 (1984)
- 9) 例えば, 松田次郎, 矢野 宏：合成樹脂, 30, 5 (1984)
- 10) 例えば, 永井 總, 今井秀孝, 飯塚幸三, 藤井 誠：温湿度による熱可塑性高分子材料の寸法変化, 工技院研究報告, No.1 (1981)
- 11) 日本産業技術振興協会編：我が国の知識集約型産業の今後の動向調査研究報告書, 同協会 (1982)
- 12) 日本合成樹脂技術協会：合成樹脂, 31, 12 (1985)
- 13) 宮脇淳一, 本間精一, 桜井正憲, 矢野 宏：合成樹脂, 30, 6 (1984)
- 14) M.S. Phadke: Quality Engineering Using Design of Experiments, An Invited Paper for the 1982 Joint Statistical Meetings, The Amer. Statistical Assoc., (1982)
- 15) 田口玄一：実験計画法 (下), 丸善 (1977)