流動解析シミュレーションの 信頼性評価方法の検討

渡部 修*・長谷川 隆*・菊地 時雄*

Examination of Reliability Evaluation Method of the Flow Analysis Simulation

Osamu WATANABE*, Takashi HASEGAWA*, Tokio KIKUCHI*

So the flow analysis simulation of injection molding is a thing to reproduce the flow behavior in real molding processing with a computer faithfully, but a problem that analysis result doesn't agree with a real molding may happen not a little. This cause is the influence that using an approximation and charges for the difficult measurement, managing an impossible thing over performance of computer, because treating polymer that analysis of behavior is difficult to understand.

Actually, when using simulation, the important thing is information of agreement and disagreement, so we need to compare with real moldings and simulation output, and tie it with fixed quantity. So we used dynamic-characteristic-analysis and static-characteristic-analysis of quality engineering, and showed degree of effect of factor concerned, and reliability of simulation by comparison.

Key words : Flow analysis/Injection molding/Quality engineering/Static character/Dynamic character

1. 緒 言

射出成形の流動解析シミュレーションは、実際の成形加工時の流動挙動を忠実にコンピューターによって再現しようというものであるが、実際の成形品と比較すると一致性に問題があるものも少なくない。これは、挙動の解析が難解なポリマー材料を扱うために、近似式を用い、データ測定が難しいものは代用特性を使用したり、また、コンピューターの性能上、無理なものがあるなどの影響であるとされる。

実際にシミュレーションを活用する時には、一致、

不一致の情報が重要であり、実際の成形とシミュレーション出力を定量的に結びつけ、比較できるようにすることが必要になる¹⁾。そこで著者らは、品質工学における動特性²⁾、静特性解析の手法を用いて、実際の成形品とシミュレーション出力結果に対して、成形条件など、射出成形に影響する関連因子の効果の程度を定量的に表し、比較することにより、シミュレーションの信頼性の評価を試みた。

2. 実験方法

2.1 使用材料・機器

ポリプロピレン (PP) : エースポリマー製エースポリプロ MA 410

射出成形機 : ファナック製 FANUC AUTOSHOT T-50D

三次元測定機 : カール・ツァイス製 UPMC 550

* 福島県ハイテクプラザ 材料技術部 有機材料科
郡山市片平町字山神館 7-2 (〒963-02)
Fukushima Technology Centre
7-2 Yamagamiyakata, Katahira-machi, Koriyama,
Fukushima 963-02 Japan
1995. 10. 13 受理

Fig. 1 Shape on analysis (Unit : mm)

CARAT. 三次元測定については、測定圧補外機能による 0 補正の接触式による測定方法を行った。

流動解析シミュレーションシステム：プラメディア リサーチ製 PLANETS

2.2 成形品形状およびシミュレーション入力形状

シミュレーションの形状入力は、厚みと表裏の要素を持たせた平面の組み合わせで行う。形状入力の後、自動で 2000 程度のメッシュを切って解析を行う。

入力形状はすべて多面体による近似になっており、特に曲線部は実際の成形金型寸法と正確には一致しない。この点を除き、できる限り図面に近い値を入力をした (Fig. 1)。

2.3 成形方法 (成形条件の因子と水準)

品質工学の手法に基づき、以下のように条件設定を行った。

成形操作の中で初期に常識的に設定し、基本的に以後変更しないものは因子として取りあげない。また、使用機械の種類の違いによるものはまとめて誤差因子扱いとし、成形品を見ながら微調整していくもののみを制御因子とした。機械の安全操作・管理上、クッション量は必ず 5 mm 程度とり、スクリュ回転数は 100 rpm (40% 設定値)、スクリュの温度分布はノズル側より (高)(高)(中)(低)に固定した。

L_{18} 直交表を用い、制御因子は成形条件を前提とした¹⁾ (Table 1)。ここで、使用機器ではサイクルタイムの制御はできないため、金型が開いてから閉じるま

Table 2 Error factor on injection molding

	N_1 set	N_2
Injection step	yes (multi-step)	no (two-step/ old type)
Difference of dwelling (multi-step-dwelling/difference of top and 2nd-pressure)	yes (multi-step)	no (two-step/ old type)

Table 1 Factor and level on molding condition

Control factor	1	Level 2	3
A. Interval (s)	short(5)	long(15)	
B. Resin temperature (°C)	low(195)	middle (220)	high(245)
C. Injection speed (cm³/s)	slow(10)	middle (25)	fast(40)
(machine set) (mm/s)	(17.3)	(43.3)	(69.2)
D. Cooling time (s)	short(20)	middle (30)	long(40)
E. Dwelling time (s)	short(5)	middle (10)	long(15)
F. Dwelling (MPa)	low(39.2)	middle (58.8)	high (78.5)
Chiller set			
G. (Cavity side) (°C)	low(30)	middle (45)	high(60)
H. (Core side flow) (mm³/s)	few (10×10³)	middle (55×10³)	many (100×10³)

での時間を計測し、インターバル (追加時間) とする。射出 (injection)、保圧 (dwelling)、冷却 (計量) (cooling) の各時間に追加時間を加えたものをサイクルタイムとする。金型の冷却は、キャビティ側 (cavity side) は温調器の油温設定値を表す。コア側は冷媒 (chiller) の流量を表し (core side flow)、水を用い、密度、比熱、熱伝導率、粘度とも一定の値 (水の値) を使った。温度は、測定値 (平均 18°C) とした。成形サンプルは、条件設定後 10 ショット目を定常のサンプルとして採取した。

誤差因子については、安定した成形がしやすくなる方向の因子を N_1 、逆を N_2 で調合した⁶⁾ (Table 2)。

Table 3 Error factor on flow analysis simulation

	N_1 set	$N_2 \pm 20\%$
Resin viscosity (Pa·s)	low (measure)	high (measure ×1.2 rough)
Resin coefficient of thermal conductivity (W/(m·K))	high (measure)	low (measure ×0.8)
Resin specific heat (J/kg·K)	low (measure)	high (measure ×1.2)
Resin p - v - T data	approximate 1 (shift to left)	approximate 2 (fit to inflection point)
Resin solidification temperature (°C)	high(135)	low(170)

Fig. 2 Measure position of moldings and inputs

2.4 シミュレーション方法

(成形条件の因子と水準)

同様に L_{18} 直交表を用い、制御因子は実成形と同じ成形条件を前提とした。誤差因子についても同様に N_1, N_2 で調合した。ここでは入力する樹脂の測定物性値を誤差とした (Table 3)。

2.5 転写性の手法による評価

実験では、成形品、シミュレーション出力結果とも金型寸法を M 、入力信号に対応した製品寸法を y とした時、 $y = \beta M$ の関係が成り立つことを目的としている^{1)~3)}。つまり、この解析では、比例定数(感度係数) β は成形品の収縮率に当たり、実験による最適化は成形品形状において、あらゆる寸法に対して収縮率を一定にすることに当たる⁵⁾。

信号因子は、Fig. 2 に示したように 9 水準とする。

2.6 成形品の望小特性による評価

成形不良の有無を考え、位置や数、程度を考慮して相対的な数値の割り当てをして、その数字の増減で評価する^{1)~4)}。実験では 0, 3, 5 とする(計算の都合上、合計 0 の時は $0 = 0.001$ とする)。内容的には望小特性になる。

ここでは数値の割り当てで評価の程度が決まってしまうため、成形品によって成形不良のバランスを考慮する必要がある。Table 4 に割り当てを示す。

2.7 シミュレーション出力結果の望小特性による評価

シミュレーションの出力結果は、成形品のように目に見える形での成形不良の出力はできないため、温度、圧力、収縮率などの計算結果から、不良現象の発現と位置を推定した。以下に各不良ごとに評価方法をあげる。

a. ウエルドライン

通常、「充填解析」において会合角を設定し、充填完了時のウエルドラインの位置、長さ表示をさせて判

Table 4 Estimation of molding trouble

Molding trouble	Allotment		
Sink (position on short side/step from base)	0~2nd step=0	3rd step=3	4th step~5
Warp (long side)	0~0.2 mm (0.2)~0.5 (0.5)mm =0 mm=3		~5
Warp (short side)	0~0.4 mm (0.4)~0.6 (0.6)mm =0 mm=3		~5
Length of weld line	0~13 mm (13)~15 (15)mm =0 mm=3		~5
Flow mark	no=0	light=3	heavy=5
Silver streak	no=0	light=3	heavy=5
Void	no=0	light=3	heavy=5
Barr	no=0	light=3	whole parting line=5
Short shot	no=0		yes=5
Jetting	no=0		yes=5
Rough of surface	no=0		yes=5
Crazing	no=0		yes=5
Burning	no=0		yes=5

断に使用するが、詳細な精度での評価には使用できないため、今回は樹脂流れのためらい部分を使用した。

樹脂の充填時に流れがためらう部分ができると先端の樹脂表面が冷え、ためらい後に樹脂が会った時に接合しにくくなり、ウエルドラインがきつく現れると考えられる。今回の成形品については、薄肉側面(長辺側のゲート側中心から垂線を引き、流れのためらいの最後のラインとの交点を区切りとして全長 a とためらい以降の流れの距離 b との比を取り、比較した (Fig. 3)。つまり、 $(b/a) \times 100$ とする。点数の割り当ては以下の通りである。

比(%): $\sim 72 = 0$, $(72) \sim 77 = 3$, $(77) \sim 5$

ただし、ためらい部分の温度が樹脂の最低成形温度 180°C 以上のものは、ためらい後も接合するに充分な温度であり、ウエルド発生率は低くなると考えて、割

Fig. 3 Estimation of weld line (Simulation)

り当ては0とした。

b. そり (長辺, 短辺)

「そり解析」において, ゲートを不動点としたそりの位置表示をさせ, 各辺の中央について測定した。

長辺のそり評価方法は, 収縮した長辺の両端に接する直線を引き, さらにこの直線の中央から垂線を引く。短辺の金型寸法 a とこの垂線のそり曲線と交差する点までの長さ b との比を取り, 比較した (前節の式に同じ。Fig. 4)。

短辺のそり評価方法も同様に行った。点数の割り当ては以下の通りである。

長辺比 (%) : $\sim 9=0$, $(9) \sim 15=3$, $(15) \sim =5$

短辺比 (%) : $\sim 4=0$, $(4) \sim 6=3$, $(6) \sim =5$

c. ボイド, ひけ

「保圧冷却解析」において, 保圧打ち切り直前の表面および中心部の温度分布を表示させ, 最肉厚部 (短辺1段目) について検討した。ここでは, 樹脂の最低成形温度 T_L (保压下) を 185°C とした。

表面温度と中心温度が T_L 以上の場合に保圧が切れると外側と内側から収縮することが可能なので, ボイドはできにくく, ひけになる確率が高くなる。また, 表面が冷えていて中心温度が T_L 以上の場合は内側から収縮するため, ひけにはなりにくく, ボイドができる確率が高くなる。

保圧が切れる時に表面も中心も T_L 未満の場合は, すでに保圧がかからず, 収縮は大半終了しており, 状況が不明確であるため, 両方の不良が現れる確率がある。しかし, 表面が冷えるまでは保圧はかかっており, 大きなひけやボイドにはなりにくくとも考えられるため, 小さな程度で両方に点数を割り当てた。

ボイド有無 : $[T_L \leq \text{表面}, \text{中心温}] = 0$, $[\text{表面}, \text{中心温} < T_L] = 3$, $[\text{表面温} < T_L \leq \text{中心温}] = 5$

ひけ有無 : $[\text{表面温} < T_L \leq \text{中心温}] = 0$, $[\text{表面}, \text{中心温} < T_L] = 3$, $[T_L \leq \text{表面}, \text{中心温}] = 5$

d. バリ

「充填解析」において, 表面の温度分布を表示させ, 充填完了時のパーティングライン付近の表層最高温度を検討した。樹脂の最低成形温度 T_L (保压下) 以上になっていれば流動先端に高圧がかかるため, 過剰圧力であればバリができる確率が高い。また, この際に不均一にパーティングライン付近に圧力がかかれば, さらに金型が開く可能性が高いため, 最高圧力の偏りも考え合わせた。点数の割り当ては有無の2つにする。

有無 : $[\text{表面温度} < T_L] = 0$, $[T_L \leq \text{表面温度}] = 5$

e. 表面の凹凸

「保圧冷却解析」において, 離型時の成形収縮率を表示させ, 表面に収縮率の乱れがあるかどうかを見た。

Fig. 4 Estimation of warp (Simulation)

この場合, 注目部位にボイドのできる可能性がないことも確認する (計算上ボイドは考慮されていないため, 表面だけに着目すれば誤った判断をする可能性がある)。点数の割り当ては有無の2つにする。

有無 : 収縮率の乱れなし $= 0$, 乱れあり $= 5$

f. ショートショット

「充填解析」において, 充填完了時の圧力分布を表示させ, 金型注入口 (スプルー入口) 付近の圧力を検討した。このシミュレーションは充填段階は速度制御であり, 射出圧力オーバーでのショートショットの表示はできない。つまり, 樹脂を流動させるのにどれくらい圧力が必要かを表示している。したがって, ショートショットになる場合は, いちばん圧力がかかる部分の圧力が異常に高くなる (成形機の射出能力以上になる) 可能性がある。点数の割り当ては有無の2つにする。

有無 : 異常圧力なし $= 0$, 異常圧力あり $= 5$

g. その他

フローマークについては成形品に不良が現れなかったため, 十分な検討ができなかった。シルバーストリーク, ジェットティング, クレイジング, 焼けについては充分な解析方法について検討できなかった。

3. 結 果

3.1 転写性の手法による結果

a. 成形品の解析

実験例として寸法測定の日データ (実験番号1) を Table 5(a) に示す。これらのデータを計算式に代入して計算, 解析した^{4), 5)}。実験 2~18 のデータ, 割り付けと解析結果は省略する。

M : 信号因子

m : 信号因子の水準数 (1~9)

N_1 : 誤差因子の条件 1

N_2 : 誤差因子の条件 2

t : 小計値

f : 自由度 (変動の計算における未知数の数)

Table 5 Data of measure (unit : mm)

(a) Moldings (experiment No.1)

Signal factor	M_1 81.19	M_2 88.79	M_3 71.68	M_4 68.34	M_5 76.91	M_6 56.51	M_7 63.25	M_8 72.11	M_9 50.00
Error factor N_1	77.66	87.40	68.95	66.96	75.39	55.74	61.77	70.72	49.46
N_2	77.73	87.27	69.13	66.88	75.00	55.69	61.62	70.55	49.00
Total	155.39	174.68	138.08	133.84	150.39	111.43	123.39	141.28	98.46

(b) Simulations (experiment No.1)

Signal factor	M_1 80.62	M_2 87.75	M_3 69.89	M_4 67.83	M_5 76.44	M_6 55.90	M_7 63.25	M_8 72.11	M_9 48.83
Error factor N_1	80.54	87.68	69.80	67.77	76.36	55.83	63.17	72.03	48.77
N_2	80.56	87.69	69.78	67.77	76.35	55.82	63.17	72.02	48.76
Total	161.10	175.37	139.58	135.54	152.72	111.66	126.34	144.05	97.53

全二乗和

$$S_T = \sum y_{m,N_1}^2 + \sum y_{m,N_2}^2 \quad (f=9 \times 2=18) \quad (1)$$

有効除数

$$r = 2 \times \sum M_m^2 \quad (2)$$

回帰変動

$$S_\beta = \frac{(\sum M_m \cdot M_{m,t})^2}{r} \quad (f=1) \quad (3)$$

誤差変動

$$S_e = S_T - S_\beta \quad (f=f_T - f_\beta=17) \quad (4)$$

誤差分散

$$V_e = \frac{S_e}{17} \quad (5)$$

SN 比 η (dB)

$$\eta = 10 \log \left\{ \frac{(S_\beta - V_e)}{(r \cdot V_e)} \right\} \quad (6)$$

感度 $S_{(\beta)}$ (dB)

$$S_{(\beta)} = 10 \log \left\{ \frac{(S_\beta - V_e)}{r} \right\} \quad (7)$$

これをもとに作成した要因効果図をFig. 5(a), (b)に示す。ここで、図横軸の Level の値は Table 1 の各 Control factor の Level の条件の値に対応している。以下の各要因効果図も同様である。

b. シミュレーション出力結果の解析

実験例として特徴点間の距離測定 of データ (実験番号 1) を Table 5(b) に示す。これらのデータを計算式に代入して計算、解析した⁷⁾。計算式は前述の成形品の解析と同様である。

これをもとに作成した要因効果図をFig. 5(c), (d)に示す。

3.2 望小特性の手法による結果

a. 成形品 (全体) の解析

実験では、ショートショット、焼け、クレイジング、フローマークの不良の出た成形品はなかった。

実験例として実験 1 のデータを Table 6(a) に示す。計算式は以下のとおりである^{4), 6)}。

N_1 : 誤差因子の条件 1 該当データ

N_2 : 誤差因子の条件 2 該当データ

k : データ数 (18)

k' : データ数 (6)

A_1, A_2 : 制御因子 A の水準 (2)

B_1, B_2, B_3 : 制御因子 B の水準 (3)

制御因子 C~H についても同様

CF: 修正項

X: 選択因子の種類 (A~H, e)

SN 比

$$\eta = -10 \log \left\{ \frac{(N_1^2 + N_2^2)}{2} \right\} \quad (8)$$

各選択因子 (A~H, e) の変動

$$S_T = \sum \eta^2 - CF \quad (9)$$

$$CF = \frac{\sum \eta^2}{k} \quad (10)$$

$$S_A = \frac{(\sum \eta_{A_1} - \sum \eta_{A_2})^2}{k} \quad (11)$$

$$S_B = \left\{ \frac{(\sum \eta_{B_1}^2 + \sum \eta_{B_2}^2 + \sum \eta_{B_3}^2)}{k'} \right\} - CF \quad (12)$$

$S_C, S_D, \dots, S_H$ についても S_B と同様の計算式

$$S_e = S_T - (S_A + S_B + \dots + S_H) \quad (13)$$

各選択因子の分散

$$V_X = \frac{S_X}{f_X} \quad (14)$$

これをもとに作成した要因効果図を Fig. 5(e) に示す。

b. 成形品（各成形不良に限定）の解析

各成形不良，ウェルドライン，そり（長辺，短辺および両辺の合計），ひけ，ボイドなどについて，個別に解析を行った．計算方法は同様，要因効果図は省略する．

c. シミュレーション出力結果（全体）の解析

実験ではショートショットの不良は発現しなかった．フローマーク，シルバーストリーク，ジェットイング，

クレイジング，焼けについては，評価項目から外した．

実験例として，実験1のデータを Table 6(b) に示す．他のデータおよび割り付けと解析結果は省略する．また，計算式は同様である．これをもとに作成した要因効果図を Fig. 5(f) に示す．

d. シミュレーション出力結果（各成形不良に限定）の解析

同様に各成形不良，ウェルド，そり（長辺，短辺），

(a) SN ratio/result of transformability
— analysis/molding

(b) Sensitivity/result of transformability
— analysis/molding

(c) SN ratio/result of transformability
— analysis/simulation

(d) Sensitivity/result of transformability
— analysis/simulation

(e) SN ratio/result of statical
— characteristic-analysis/molding

(f) SN ratio/result of statical
— characteristic-analysis/simulation

Fig. 5 Effect of factor (●: Interval, ■: Resin temperature, ◆: Injection speed, ▲: Cooling time, ○: Dwelling time, □: Dwelling, ◇: Chiller temperature, △: Chiller flow)

ひけ、ボイドについて個別に解析を行った。計算方法は同様、要因効果図は省略する。

4. 考 察

ここで、SN 比(dB)の高低は誤差の変化を評価する尺度であり、無名数として直接比較することを可能にしている。高い水準を選ぶことで目的の特性に対して安定で効果の高い水準を見付けることができ、その安定性を定量的に表現したものである。

それぞれの手法による結果から SN 比の高い水準を選定し、最適水準を推定すると Table 7 のようになる。

成形品およびシミュレーション出力結果の全体評価について、転写性および望小特性による解析結果の有効性、信頼性を確認する意味で推定および確認実験をした。SN 比の推定は、SN 比の平均値 $\bar{T}$ との差が大きな因子を用い、初期条件 ($A_1B_2C_2D_2E_2F_2G_2H_2$) との差を利得とした。結果は Table 8 のとおりである。なお、計算式は以下のとおりである⁴⁾。

- p : 選択水準 (1~3)
- q : 合計因子数

Table 6 Assignment and analysis result (unit : mm)

(a) Moldings

Experiment/ control factor	A B C D E F G H	N_1 data	N_2 data	SN ratio η
1	1 1 1 1 1 1 1 1	18	24	-26.53

(b) Simulations

Experiment/ control factor	A B C D E F G H	N_1 data	N_2 data	SN ratio η
1	1 1 1 1 1 1 1 1	19	20	-25.80

$\bar{T}$: SN 比の平均値

η 利得 (SN 比)

$$\eta = \sum X_p - (q-1)\bar{T} \tag{15}$$

以上の結果より、ばらつきはあるが、SN 比の向上など、ほぼ妥当であり、実験は有効であると判断した。

次に、成形品およびシミュレーション出力結果の望小特性解析の結果について、最適条件のうち分散の状態をみて成形に大きく影響する因子を選定し、寄与率 ρ を求めた。その結果は Table 9 のとおりである。なお計算式は以下のとおりである⁴⁾。

Table 7
List of best level

Object Factor	Moldings								Simulations							
	A	B	C	D	E	F	G	H	A	B	C	D	E	F	G	H
Transformability	2	1	1	2	2	3	2	1	2	1	1	3	2	2	3	3
Statical-character	1	3	1	3	2	3	1	1	2	3	1	3	1	3	3	3
Weld	1	3	3	3	2	1	3	1	1	3	3	3	1	1	3	2
Warp (long)	1	2	3	2	3	3	2	2	2	1	1	3	3	2	2	1
Warp (short)	2	3	2	2	1,2	2	3	1	2	1	1	3	3	2	2	1
Sink	2	1	2	1	2	3	1	1	2	1	2	1	3	3	2	1,2
Void	2	3	1	3	2	1	3	2	2	2	3	3	1	2	3	1
Burr	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*	1	*	*	*	*
Surface	1,2	1	1,3	1,2	1,2	2,3	1	1,3	1	3	1,3	1	1	2,3	1	1
Silver streak	1	2,3	2	3	3	2,3	2,3	2								
Short shot									*	2,3	2,3	1,3	1,3	1,3	1	2,3

※ Oblique style : Low reliance for dispersion — : No confirmation
* : Each level is same value

Table 8
Result of confirmation-experiment (SN ratio (dB))

	Moldings			Simulations		
	Best condition	First condition	Gain	Best condition	First condition	Gain
Transformability (presumption) (confirmation)	4.44	2.35	2.09	39.86	37.02	2.84
	2.43	1.85	0.58	39.29	37.02	2.27
Statical-character (presumption) (confirmation)	-21.5	-25.7	4.20	-22.7	-26.0	3.30
	-18.1	-25.9	7.80	-19.1	-26.8	7.70

Table 9 Factor and contribution ratio
(a) Moldings

Molding trouble	ρ_A	ρ_B	ρ_C	ρ_D	ρ_E	ρ_F	ρ_G	ρ_H
Total	—	4.05	8.83	6.32	1.63	59.0	—	—
Weld line	—	0.35	79.7	—	—	0.35	—	—
Warp (long)	5.81	—	—	1.14	—	58.8	—	9.20
Warp (short)	—	28.3	6.66	5.15	4.75	6.17	24.9	24.0
Sink	—	—	5.27	20.2	—	29.7	—	—
Void	—	8.91	9.32	15.27	9.7	9.32	6.99	8.59
Burr	—	—	100	—	—	—	—	—
Surface	—	11.7	—	—	—	55.8	11.7	—
Silber streak	—	20.4	—	—	—	20.4	20.4	—

(b) Simulations

Molding trouble	ρ_A	ρ_B	ρ_C	ρ_D	ρ_E	ρ_F	ρ_G	ρ_H
Total	5.73	—	24.9	38.1	3.38	18.5	—	—
Weld line	—	—	48.5	—	—	—	12.7	—
Warp (long)	6.56	2.20	2.27	5.43	—	1.42	—	—
Warp (short)	3.26	3.91	—	6.57	1.74	—	—	—
Sink	16.8	—	11.7	45.6	—	13.6	11.7	—
Void	7.58	—	—	4.43	18.7	18.9	—	—
Burr	—	—	100	—	—	—	—	—
Surface	8.80	—	—	—	—	35.8	—	—
Short shot	—	—	—	—	—	52.7	9.89	—

プールした誤差分散

$$V_{(e)} = \frac{(\sum S_X + S_e)}{(\sum f_X + f_e)} \quad (16)$$

各選択因子の寄与率

$$\rho_X = \frac{(S_X - f_X \cdot V_{(e)}) \times 100}{S_T} \quad (17)$$

以上の結果より、成形不良の評価について考察した。動特性、静特性の性格の上から、転写性の解析結果を基準として考察を進めた^{1),2)}。まず、成形不良の評価の基準となる成形品の解析結果について考察した。

今回の実験で、転写性の解析結果は成形品およびシミュレーション結果ともに全体的に SN 比の差が出ない傾向にあるが、これは実験的に測定部位や測定方法に問題がある可能性が高い。絶対値 (dB) としては、低レベルの増減であり、利得などで残念ながらその効果を判断するには不十分である面があることは否めない。特に成形品の実験では顕著であるが、今回は最適条件の推定が過大だったため利得に大きな差 (絶対値としては大きいとは言えないが) が生じたものとして考察を進める。

各成形不良の解析は静特性解析の結果であり、要因

Fig. 6 Comparison of contribution-ratio

的寄与の比較の意味では成形不良全体の解析も静特性解析の結果であることが望まれる。この成形不良全体の解析結果が基準となる転写性による解析結果を良く反映していることが条件であるため、最適水準の比較で一致性を判断した (Table 7 参照)。ここで信頼性の低いと判断できる因子を除けば、全く一致していないのは B の樹脂温度だけであり、全体的に効果の大きい因子について傾向が一致している。したがって、成形不良全体の望小特性の解析結果は、基準となる動特性の解析結果をよく反映していると考え、有効であると判断した。

これらより、個別に成形不良を取り上げて解析をすれば成形品全体に及ぼす各不良の影響を把握することができると考えられ、成形品の解析結果を基準としてシミュレーション結果を考察した。

実成形と流動解析シミュレーションにおける各成形条件 (制御因子) の寄与率の差についてわかりやすくグラフで比較してみる (Fig. 6)。ここでは誤差の変動を無視し、寄与している要因のみで 100% になるようにノーマライズした。

ウェルドラインについては、最適水準を比較すると信頼性を考慮すればほとんど同じ傾向を示しており、非常に良い一致性を示す。この不良現象は、樹脂の融合の不具合であるため、樹脂を最小限にして充填完了できるような成形条件の設定をする。寄与率をみると、射出速度が大きな影響を与えるのは当然であるが、シミュレーション結果が冷媒温度の影響をやや過大に評価していると考えられる。

長辺および短辺のそりについては、最適水準を比較

すると全く違う傾向を示しているといえる。その原因は、成形品の冷却不均一時に発生した内部応力がその緩和のために変形を起こすことによる。この成形品の長辺は肉厚が均一であり、成形品の外側、内側の冷却の差が顕著に現れる。したがって、冷却水の流量調整と冷却時の形の固定が解決策となる。成形品の解析結果はこれを示しているが、形の固定に関する保圧力の影響が非常に大きいのが意外である。短辺の場合は成形品に階段状の肉厚の変化があり、肉厚の変化による冷却の違いが影響を及ぼすため、長辺のそりとは性格を異にし、ボイド、ひけ、そりの影響が複雑に絡んでいると考えられる。しかしながら、シミュレーションの結果は、最適条件において長辺、短辺の差がなく、寄与率を見ても重要な因子である保圧力、冷媒流量の影響を全く示していない。

ひけについては、最適水準をみてみると信頼性を考慮すればほとんど同じ傾向を示しているといえる。この不良の原因は、成形品の冷却時に最後に固化する肉厚部の表面に体積収縮が集中することによる。したがって、保圧力を上げ、冷却時間を長くすることで固化の均一化を図る。寄与率については、影響のある因子について程度の差はあれ、良く示している。インターバルと冷媒温度については過大評価している傾向がある。

ボイドについては、最適水準をみてみると違う傾向を示しているといえる。この不良の原因は、ひけと同様であるが、最後に固化する肉厚部の中心部に体積収縮が集中するところが異なり、冷却の際に、中心部より先に表面が強固に固化することによる。対策もひけと同様に固化の均一化を図る。寄与率を見ても明白な比較はできないが、インターバルの過大評価の傾向はあるようだ。冷媒関係の影響については、要因効果図にも示されるが、解析自体がうまくいかなかったことによると考えられる。

バリについては、とりあえず一致している。この不良は金型の型締圧力と射出圧力のバランスの問題で、金型が若干開くために起きる。したがって、充填完了時の圧力が問題となり、樹脂の挙動ではなく機械的な問題である。保圧切替位置と射出速度、射出圧力が影響するため、この実験の解析結果は妥当かと考えられる。

その他の不良である表面の凹凸、シルバーストリックについては、発現サンプル不足のため、実験のデータ精度も悪く、最適水準についても傾向を読みとるのは難しい。

これらの結果を踏まえて、成形不良の出力結果が一致しない原因について全体的に考察してみた。

成形を基準として全体的にシミュレーションの各要因の傾向を箇条的にあげてみる。

- ・インターバル時間の影響を高く評価する傾向がある。
- ・樹脂温度の影響を低く評価する傾向がある。
- ・保圧力の影響を低く評価する傾向がある。
- ・冷媒温度の影響の評価が一定でない。
- ・冷媒流量の影響を低く評価する傾向がある。

これ以外の要因についてはほぼ妥当と考えられる。これらの結果は、実際の成形では、インターバル時間はそれほど影響せず、樹脂温度、保圧力はいちほど効いており、冷媒で金型はもっと冷えているということを示している。いっぽう、全体的な成形品の解析では、成形加工に影響する因子は、樹脂温度、射出速度、保圧力であるという結果が出ているため、樹脂温度、保圧力が絡んでおり、寸法的な成形不良に対しては特に一致性は悪くなると考えられる。結果もその傾向を示している。

実験で使用しているシミュレーションソフトウェアは、大きく4つに分けられる。樹脂を射出する前の金型の熱収支(定常状態)をシミュレートする「金型冷却解析」、充填してから離型するまでをシミュレートする「充填解析」、「保圧・冷却解析」、「そり解析」である。今回の報告では「金型冷却解析」についての解析には触れていないが、実験の結果、サイクル時間、樹脂温度、キャビティ側の冷媒(オイル)温度の3つに大きく影響されるという結果がでている。したがって、今回の寄与率の比較についてのインターバル時間、樹脂温度、冷媒温度、冷媒流量の影響の評価のずれはいずれも「金型冷却解析」に起因している部分が多いのではないかと予想される。

この結果を踏まえて、例えば、シミュレーションソフトでこのずれに影響する解析方法、代用特性の扱い、補正などについてさらに詳細に検討していけば、原因の追究と改善により、信頼性の高いソフトが構築できるものと考えられる。

5. 結 言

今回、シミュレーションを活用する立場から、シミュレーションを構成する個々の要因ではなく、総括した機能の評価をするという視点で、成形不良の発現を通して信頼性の評価を試みた。品質工学の手法を用い、実成形と流動解析シミュレーションについて転写性と望小特性による解析方法を駆使して、同じ次元でその要因効果の違いについて定量的に比較検討することができた。結果的にはまだ充分といえない部分もあるが、シミュレーションの活用において定量的考察の1つの手法として十分に活用できるものと考えられる。

今後は、評価精度をさらに上げるために、シミュレーション出力結果の読みとりとそれを使った成形不良の評価方法の改善について、また成形品形状の違いによる影響の差異についても検討していきたいと考える。

参 考 文 献

- 1) 矢野 宏：合成樹脂，37(12)，1 (1991)
- 2) 矢野 宏，鴨下隆志：成形加工，3(8)，509(1991)
- 3) 立林和夫：品質工学，1(5)，14 (1993)
- 4) 田口玄一，横山巽子：品質工学講座4，品質設計のための実験計画法，(1988)日本規格協会
- 5) 田口玄一，馬場幾郎：品質工学応用講座，転写性の技術開発，(1992)日本規格協会
- 6) 射出成形の流動解析と金型による評価の適合性：日本機械工業連合会，先端加工機械技術振興協会(1990)
- 7) 渡部 修，長谷川隆，菊地時雄：品質工学，3(6)，35 (1995)
- 8) 渡部 修，長谷川隆，菊地時雄：福島県ハイテクプラザ試験研究報告，平成6年度，58 (1994)