

セラミックス射出成形技術の高度化研究

— 品質工学によるリブ付き成形品の射出条件最適化 —

機械金属部 森田春美, 松田次郎*, 小池昌義**

Study on Injection Forming of Ceramics

— Optimization of Forming Conditions of Product with Rib by Quality Engineering —

Harumi MORITA, Jiro MATSUDA and Masayoshi KOIKE

セラミックス射出成形の一連の工程を生産システムとしてとらえ、品質工学手法を用いて成形技術の基本機能である転写性を評価尺度として、セラミックス射出成形工程の最適化について検討した。セラミックス射出成形での転写性は、金型寸法と成形品寸法が相似形であることを理想とすることから、評価にはゼロ点比例式のSN比を用いた。その結果、バインダー比率、射出圧力、樹脂温度など、リブ付き成形品の最適射出成形条件を得ることができた。

1. 緒言

セラミックスは物性面で優れた特徴を持つ新材料であり、特に耐熱性、耐食性、耐摩耗性、高硬度などに注目され、種々の産業分野へ応用され、利用技術、生産技術が開発されてきている。中でも射出成形法は三次元形状が容易にかつ効率的に生産できることから大企業を中心に導入が計られている生産技術である。

セラミックス射出成形の研究はセラミックス粉末と助剤の調合、混合を中心とした物性問題を研究することから行われ、個別的な技術では多くの成果が報告されている。しかし要素工程が重なるセラミックスの射出成形を生産システムとしてとらえ、工程の最適化という観点からの系統的な研究報告は少ない。

本研究ではこのような技術的背景に対し、いま様々な産業分野で注目されている品質工学手法を用い、複数工程をとる射出成形を対象に成形技術の評価法として、その基本機能に着目したときの評価尺度となる転写性の観点からの工程の最適化について検討した。

2. 実験の計画

セラミックスの射出成形は、あらかじめ調整した有機材料とセラミック粉末の混合材料を加熱混練（混練工程）した混合物ペレットを成形機内で加熱可塑化させた後、高圧力を加えて金型に射出充填する。充填と同時に冷却あるいは加熱して成形体を得る（成形工程）。つぎに加熱により有機材料を除去（脱脂工程）し、セラミック粉末のみの成形体とし、焼結（焼結工程）して最終製品となる。

これらの各工程より主たる因子を抽出し、全工程を1つのシステムとしてとらえた実験を行った。

2.1 制御因子

制御因子とは、転写性を向上させるために意図的に変化させることのできる条件であり、表1に示した8つの因子を選定した。混練工程における加熱流動性の効果を考慮し、結合剤にPP、PS、EVAの3種類、滑剤はステアリン酸、添加して可塑化する外部可塑剤（物理的混合により可塑性を与えるもの）としてDBPを選定した。用いたアルミナおよび有機材料を表2に示した。成形工程での条件は、長屋ら¹⁾の研究において、その寄与が小さいことが明らかにされていることから樹脂温度、射出圧力に絞った。また脱脂・焼結工程での条件は、松田ら²⁾の研究において転写性に関して、その寄与が小さいことが明らかにされていることから固定条件とした。

表1 制御因子と水準値

要因	水準			単位
	1	2	3	
A: 結合剤 PP	0	26	-	g
B: 可塑剤 DBP	19.5	26	39	g
C: 滑剤	78	65	52	g
D: 結合剤 PS	19.5	26	32.5	g
E: WAX	39	52	65	g
F: 結合剤 EVA	78	65	52	g
G: 射出圧力	37.5	50	62.5	MPa
H: 樹脂温度	423	453	473	K

表2 アルミナと有機材料

材料名	規格および製造元	
アルミナ	易焼結アルミナ AES-21	住友化学
結合剤 PP	UPP [®] リアロ MS-500ナチュラム	ユニオンリマ
	(A)S130MX (B)J815HK 1:1混合	
PS	トネレックス 525-51 N10	三井東圧
EVA	エチレン酢酸ビ共重合体	東ソー
可塑剤	フタル酸ジブチル(DBP)	ゴートン溶剤
滑剤	粉末ステアリン酸	日本油脂
ワックス	パライソワックス Mel. p 70°C	小宗化学

*, ** 工業技術院計量研究所計測数理研究室
National Research Laboratory of Metrogy

制御因子を表3のように、 L_{18} 直交表に割り付け、有機材料のアルミナに対する割合を重量%で示した。

表3 L_{18} 直交表への制御因子の割り付け

No.	制 御 因 子								wt%
	A	B	C	D	E	F	G	H	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	9.00
2	1	1	2	2	2	2	2	2	8.75
3	1	1	3	3	3	3	3	3	8.50
4	1	2	1	1	2	2	3	3	9.25
5	1	2	2	2	3	3	1	1	9.00
6	1	2	3	3	1	1	2	2	8.75
7	1	3	1	2	1	3	2	3	9.00
8	1	3	2	3	2	1	3	1	10.25
9	1	3	3	1	3	2	1	2	9.25
10	2	1	1	3	3	2	2	1	11.00
11	2	1	2	1	1	3	3	2	8.50
12	2	1	3	2	2	1	1	3	9.75
13	2	2	1	2	3	1	3	2	11.50
14	2	2	2	3	1	2	1	3	9.75
15	2	2	3	1	2	3	2	1	8.75
16	2	3	1	3	2	3	1	2	10.75
17	2	3	2	1	3	1	2	3	11.25
18	2	3	3	2	1	2	3	1	9.50

2.2 信号因子

信号因子とは成形品を意図的に変化させるための条件である。転写性においては、金型寸法を信号因子とすることが基本である。本実験に用いた金型は、表4に示した因子を表5のように、 L_{12} 直交表に割り付けて製作した。

基板の寸法は30×70 mmとし、ゲート位置については長手方向を4等分し、左右側の2ヶ所とした。

表4 信号因子と水準値

要 因	水 準		単 位
	1	2	
A: 長さ	5	10	mm
B: 厚さ	2	3	mm
C: 距離	5	20	mm
D: 板厚	3	5	mm
E: 高さ	5	10	mm
F: 低部のR	0	1	mm
G: 流れ方向	縦	横	

表5 L_{12} 直交表への割り付け

No.	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2
3	1	2	2	2	1	1	2
4	2	1	2	2	1	2	1
5	2	2	1	2	2	1	1
6	2	2	2	1	2	2	2
7	1	2	2	1	1	2	1
8	1	2	1	2	2	2	1
9	1	1	2	2	2	1	2
10	2	2	1	1	1	1	2
11	2	1	2	1	2	1	1
12	2	1	1	2	1	2	2

2.3 誤差因子

誤差因子は意図的に設定することができず、また寸法の比例関係にばらつきを与える条件である。品質工学の実験では誤差条件をわざと取り入れ、それでもSN比の高い条件を見つけることを目的としている。その意味で誤差因子Nの選定は最も重要なことである。ここでは初期工程で最終製品を予測すること、および現状の技術水準において最も重要視されている工程を考慮し、混練工程から選択した。具体的にはアルミナがロットによってばらついたとしても成形性の良い条件を見つけるために、また粒度の異なる混合粉体は粒子の充填状態および混合比により成形体の気孔分布が異なり、焼成後の気孔径分布も変化することなどを検討し、アルミナの平均粒径とした。つまり有機材料と混練する主材料であるアルミナの総量を平均粒径0.6 μ mを用いた場合をN₁、アルミナ総量の80%を平均粒径0.6 μ m、残りを平均粒径0.4 μ mとした場合をN₂とした。

2.4 金型とキャビティ

実験に供した金型は図1に示した2つのキャビティから構成されている。キャビティは、中央のスプールから対称に2つのランナーを通して配置した。今回の実験では、右側のランナーを封鎖し、リブ構造を持つ左側部分のキャビティのみが充填するようにして射出成形を行い、転写性について検討した。

また右側部分は立体斜め構造のキャビティであり、今回得られた最適条件を用いて射出成形を行い、得られた条件が構造の異なるキャビティへ利用できるかの可能性について検討した。

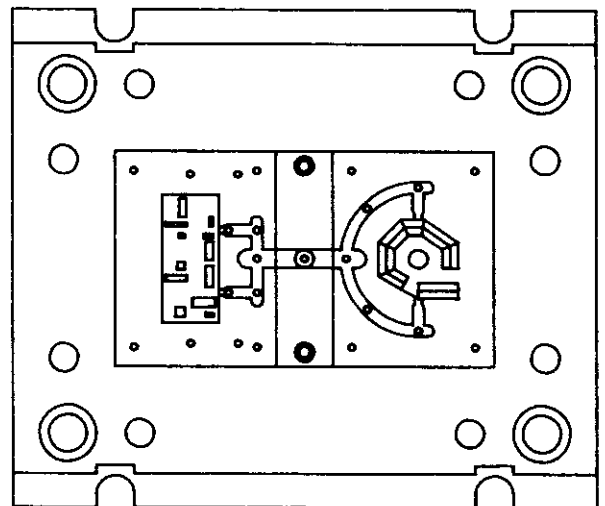


図1 金型構造とキャビティの配置

2.5 固定条件

実験に使用した混練機は、加圧型カップリング直結式混練機(株山城精機製)で混合容量3 ℓ のものである。また射出成形機は、立型射出成形機(株山城精機製、モデルSAV)。

最大型締め力55トンである。脱脂・焼成炉（仕様最大能力1700℃）はバッチ式を用いた。

実験の中で固定した条件は、混練前処理の材料攪拌にケンミックスミキサーによる攪拌条件、116 rpm、1分間。混練条件では混練時間20分間、混練機のローター回転数43 rpm、混練温度160℃および加圧力3 kgf/cm²である。

セラミックス材料はアルミナと加えるバインダーの総量が2600 gとなるようにアルミナの重量を各実験条件で変化させた。また成形時の金型温度は40℃一定とした。

脱脂・焼成工程はシステム全体として捉えたとき、成形品のばらつきに与える寄与が少ないことから、脱脂は最高温度500℃、焼成は1500℃とし、昇温曲線をプログラムして行った。

これらの各条件により作製した試料および信号因子となる金型寸法をCNC三次元測定機（ミツトヨ製、FN-704）で測定した。

成形品のショートショットを図2に示した。



図2 ショートショット（左端が製品）

3. 実験の方法

3.1 焼結品の寸法測定

試料の寸法測定は図3に示したように、基準面からの位置について試験片1個につき、X方向24ヶ所の上下2ヶ所、Y方向19ヶ所の上下2ヶ所、Z方向12ヶ所の上下2ヶ所の左右、計110ヶ所を測定した。ここで方向の定義はキャビティ内に材料が流入する際、ゲートから見て垂直方向をX、それに対して直交する方向をYとした。

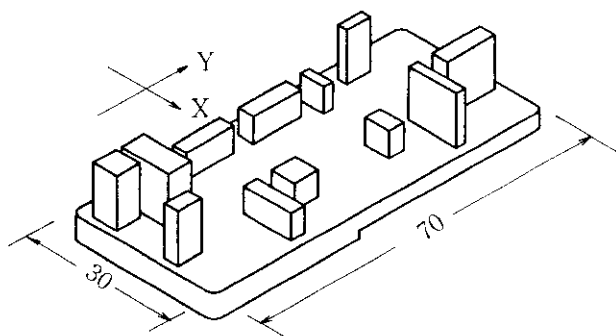


図3 測定方向の分類

本実験では各行の誤差因子1個につきショット間の誤差を考慮して2個を試験片としている。従って1行の測定箇所は440ヶ所である。

この試験片をCNC三次元測定機（最小表示値、0.001 mm）で測定した。表6に直交表L₁₈の第1行目の寸法測定結果を示した。

4. データの解析

4.1 SN比の計算例

成形加工における転写性の観点では、金型と成形品が相似形であることが理想である。成形品寸法をy、金型寸法をMとしたとき、

$$y = \beta M \quad (1)$$

となる。この関係式を基本にゼロ点比例式のSN比を求めた。一例として表6のデータを用いて、次のように算出した。

全変動

$$\begin{aligned} ST &= \sum y^2 \\ &= 1.1095^2 + 1.1175^2 + \dots + 9.0650^2 + 9.0650^2 \\ &= 224026.8723 (f = 440) \end{aligned} \quad (2)$$

有効除数

$$\begin{aligned} r &= r_0 \sum M^2 \\ &= 8 \times (1.505^2 + 7.529^2 + \dots + 10.180^2 + 10.183^2) \\ &= 277935.6544 \end{aligned} \quad (3)$$

感度係数

$$\begin{aligned} \beta &= M_1 \times Y_1 + M_2 \times Y_2 + \dots + M_{55} \times Y_{55} / r \\ &= 1.505 \times 9.554 + \dots + 10.183 \times 69.913 / r \\ &= 249523.1019 / 277935.6544 \\ &= 0.8978 \end{aligned} \quad (4)$$

比例回帰項の変動

$$\begin{aligned} S\beta &= (M_1 \times Y_1 + M_2 \times Y_2 + \dots + M_{55} \times Y_{55})^2 / r \\ &= (1.505 \times 9.554 + \dots + 10.183 \times 69.913)^2 / r \\ &= (249523.1019)^2 / 277935.6544 \\ &= 224015.6532 (f = 1) \end{aligned} \quad (5)$$

誤差変動

$$\begin{aligned} Se &= ST - S\beta \\ &= 224026.8723 - 224015.6532 \\ &= 11.2191 \end{aligned} \quad (6)$$

誤差分散

$$\begin{aligned} Ve &= Se / n - 1 \\ &= 11.2191 / 439 \\ &= 0.0256 \quad (f = 439) \end{aligned} \quad (7)$$

SN比

$$\begin{aligned} \eta &= 10 \cdot \log \{ (S\beta - Ve) / Ve \cdot r \} \\ &= 10 \cdot \log \{ (224015.6532 - 0.0256) / \\ &\quad 0.0256 \times 277935.6544 \} \end{aligned}$$

表6 寸法測定結果 (L₁₈第1行目)

測定ヶ所	金型寸法	N ₁				N ₂				
		第5ショット		第10ショット		第5ショット		第10ショット		
		1	2	1	2	1	2	1	2	
X 方 向	M 1	3.025	2.6565	2.6755	2.6510	2.6700	2.6425	2.6635	2.7270	2.7070
	M 2	8.136	7.2240	7.2405	7.2145	7.2330	7.2030	7.2225	7.2865	7.2615
	M 3	13.213	11.7640	11.7715	11.7550	11.7665	11.7615	11.7635	11.7620	11.7530
	M 4	3.021	2.6850	2.6690	2.6790	2.6655	2.6880	2.6635	2.6825	2.6615
	M 5	3.018	2.6785	2.6810	2.6715	2.6740	2.6520	2.6600	2.6890	2.6935
	M 6	5.958	5.3205	5.3200	5.3145	5.3130	5.2975	5.2980	5.3320	5.3310
	M 7	3.016	2.7580	2.7520	2.7515	2.7455	2.7460	2.7385	2.7585	2.7505
	M 8	6.255	5.6750	5.6595	5.6685	5.6530	5.6605	5.6465	5.6770	5.6580
	M 9	3.017	2.7695	2.7565	2.7625	2.7510	2.7360	2.7265	2.7355	2.7245
	M10	8.095	7.3255	7.3095	7.3185	7.3035	7.2940	7.2875	7.2895	7.2755
	M11	3.015	2.7490	2.7370	2.7400	2.7310	2.6960	2.7065	2.7835	2.7345
	M12	4.938	4.4735	4.4545	4.4655	4.4490	4.4170	4.4255	4.5075	4.4470
	M13	18.300	16.3685	16.4010	16.3595	16.3930	16.3735	16.3995	16.2270	16.3250
	M14	21.240	19.0115	19.0340	19.0025	19.0335	19.0155	19.0270	18.8715	18.9495
	M15	18.301	16.3890	16.3950	16.3820	16.3880	16.3865	16.3915	16.3465	16.3515
	M16	28.484	25.4555	25.4580	25.4490	25.4530	25.4600	25.4695	25.3960	25.3965
	M17	18.297	16.3595	16.3740	16.3530	16.3670	16.3675	16.3830	16.3255	16.3415
	M18	23.182	20.7265	20.7400	20.7200	20.7350	20.7260	20.7360	20.6850	20.6910
	M19	18.296	16.4000	16.4035	16.3935	16.3965	16.4010	16.4050	16.3500	16.3565
	M20	23.399	20.9545	20.9460	20.9470	20.9390	20.9585	20.9505	20.9050	20.8970
	M21	18.295	16.4580	16.4410	16.4490	16.4355	16.4445	16.4225	16.3255	16.3665
	M22	28.500	25.5615	25.5255	25.5515	25.5190	25.5320	25.5080	25.3925	25.4335
	M23	18.292	16.4230	16.4230	16.4155	16.4170	16.3875	16.3965	16.3310	16.3705
	M24	21.559	19.3370	19.3310	19.3290	19.3250	19.2965	19.3100	19.2315	19.2665
Y 方 向	M25	1.505	1.1095	1.1755	1.1100	1.1845	1.0855	1.1625	1.3970	1.3295
	M26	7.529	6.4565	6.5655	6.4655	6.5755	6.4920	6.5870	6.5715	6.7155
	M27	12.418	10.8040	10.9405	10.8010	10.9385	10.8385	10.9465	11.0785	11.0380
	M28	18.513	16.4945	16.5260	16.5040	16.5255	16.4945	16.5180	16.5585	16.5570
	M29	28.698	25.6175	25.6370	25.6155	25.6360	25.6020	25.6215	25.6470	25.6455
	M30	32.677	29.3760	29.3700	29.3775	29.3705	29.3625	29.3570	29.2715	29.2750
	M31	47.846	43.0595	43.0445	43.0570	43.0405	43.0360	43.0255	42.8750	42.8835
	M32	53.945	48.7250	48.6070	48.7240	48.6100	48.6710	48.5790	48.4005	48.4170
	M33	59.058	53.2790	53.1750	53.2755	53.1720	53.2320	53.1430	52.9480	52.9725
	M34	1.520	1.1280	1.2180	1.1280	1.2265	1.1650	1.2310	1.4215	1.3710
	M35	6.628	5.6805	5.7610	5.6800	5.7600	5.7125	5.7765	5.9675	5.9110
	M36	18.515	16.5080	16.5340	16.5160	16.5420	16.4895	16.5160	16.5370	16.5455
	M37	21.488	19.1665	19.1880	19.1665	19.1870	19.1645	19.1790	19.2155	19.2135
	M38	29.626	26.5080	26.5230	26.5080	26.5235	26.4970	26.5140	26.5050	26.5060
	M39	44.573	40.1770	40.1630	40.1805	40.1640	40.1570	40.1435	39.9625	39.9775
	M40	47.848	43.0935	43.0730	43.0915	43.0705	43.0650	43.0475	42.8705	42.8755
	M41	53.502	48.4210	48.2665	48.4210	48.2665	48.2910	48.1945	47.9270	48.0060
	M42	55.595	50.2990	50.1290	50.2955	50.1260	50.1695	50.0585	49.7850	49.8530
	M43	69.125	62.3405	62.2025	62.3370	62.1990	62.3185	62.1880	61.9675	61.9800
Z 方 向	M44	10.192	8.6255	8.6255	8.6360	8.6360	8.6880	8.6880	9.1140	9.1140
	M45	10.189	8.7565	8.7565	8.7645	8.7645	8.8015	8.8015	9.0405	9.0405
	M46	5.099	4.5240	4.5240	4.5290	4.5290	4.5340	4.5340	4.4980	4.4980
	M47	5.098	4.6855	4.6855	4.6890	4.6890	4.6935	4.6935	4.5300	4.5300
	M48	5.099	4.6025	4.6025	4.6040	4.6040	4.5895	4.5895	4.5240	4.5240
	M49	10.190	8.9535	8.9535	8.9525	8.9525	8.9465	8.9465	9.0990	9.0990
	M50	10.176	8.6815	8.6315	8.6955	8.6955	8.7380	8.7380	9.0945	9.0945
	M51	5.095	4.5410	4.5410	4.5580	4.5580	4.5725	4.5725	4.5345	4.5345
	M52	5.095	4.6105	4.6105	4.6230	4.6230	4.6195	4.6195	4.4835	4.4835
	M53	5.097	4.5045	4.5045	4.5150	4.5150	4.5310	4.5310	4.5100	4.5100
	M54	10.180	8.8260	8.8260	8.8360	8.8360	8.8735	8.8735	9.1255	9.1255
	M55	10.183	8.5965	8.5965	8.6040	8.6040	8.6910	8.6910	9.0650	9.0650

$$=10 \cdot \log (31.5384)$$

$$=14.99(\text{db}) \quad (8)$$

感度

$$S = 10 \cdot \log \left\{ (S\beta - V_e) / r \right\}$$

$$= 10 \cdot \log \left\{ (224015.6532 - 0.0256) / 277935.6544 \right\}$$

$$= 10 \cdot \log (0.8059)$$

$$= -0.94(\text{db}) \quad (9)$$

となる。

4.2 欠測値の処理

今回の実験においては、 L_{18} の各行それぞれ4個の成形品を試験片としたが、成形工程において全く成形できなかった行が第11行目、15行目。焼結工程において破損し、3個しか測定できなかった行が4行目、7行目、10行目、18行目、同様の理由で3行目は2個測定。9行目は1個しか測定できなかった。また成形工程でのショートショットのため成形品ができなかった行もあった。ショートショットの試験片を第5行目、8行目は4個測定、12行目は3個、6行目は2個しか測定できなかった。

これらの試験片のデータ処理として、測定できないところには、0を代入してSN比を算出した。また全く成形できなかった行には、求めたSN比の最小値に-3dbを加算した。このような処置を行った後、 L_{18} 直交表の計算を行った。その結果が表7である。

表7 L_{18} 各行のSN比

L_{18} の行	SN比 η (db)	感度 S (db)
1	14.99	-0.94
2	17.39	-0.94
3	-28.03	-6.94
4	-23.25	-3.48
5	-40.52	-26.33
6	-37.86	-21.42
7	-23.25	-3.43
8	-40.52	-26.44
9	-32.82	-13.02
10	-23.25	-3.63
11	-43.52	-8.28
12	-35.81	-17.95
13	14.36	-1.17
14	17.74	-1.03
15	-43.52	-8.28
16	16.47	-1.11
17	14.00	-1.17
18	-23.25	-3.47

4.3 制御因子の効果の検討

品質工学では製品性能の評価を行うためにSN比を用いて解析を行う。転写性の評価を行うためにデシベル値を分散分析する。表7のSN比をもとにして、各制御因子の効果を求めるため、制御因子の各水準ごとのSN比の和を求めた補助表が表8である。

表8 分散分析のための補助表と水準別平均値

因子	SN比の和			SN比の平均		
	1	2	3	1	2	3
A	-193.87	-106.78	—	-21.54	-11.86	—
B	-98.23	-113.05	-89.37	-16.37	-18.84	-14.09
C	-23.93	-75.43	-201.29	-3.99	-12.57	-33.55
D	-114.12	-91.08	-95.45	-19.02	-15.18	-15.91
E	-95.15	-109.24	-96.26	-15.86	-18.21	-16.04
F	-70.84	-67.44	-162.37	-11.81	-11.24	-27.06
G	-59.95	-96.49	-144.21	-9.99	-16.08	-24.04
H	-156.07	-65.98	-78.60	-26.01	-11.00	-13.10

これより、修正項CFは、

$$CF = (\text{全データの和})^2 / \text{全データ数}$$

$$= (14.99 + 17.39 + \dots + 14.00 - 23.25)^2 / 18$$

$$= (-300.65)^2 / 18$$

$$= 5021.6901 \quad (f = 1)$$

となり、全変動STは、

$$ST = (\text{個々のデータ})^2 \text{の和} / \text{全データ数}$$

$$= \{14.99^2 + 17.39^2 + \dots + 14.00^2 + (-23.25)^2\} / 18$$

$$= 15327.8309 / 18$$

$$= 851.5462$$

結合剤 (PP) の効果SAは、

$$SA = \{ (A_1 \text{の和})^2 + (A_2 \text{の和})^2 \} / 9 - CF$$

$$= \{ (-193.87)^2 + (106.78)^2 \} / 9 - 5021.6901$$

$$= 421.5562$$

可塑剤 (DBP) の効果SBは、

$$SB = \{ (B_1 \text{の和})^2 + (B_2 \text{の和})^2 + (B_3 \text{の和})^2 \} / 6 - CF$$

$$= \{ (-98.23)^2 + (-113.05)^2 + (-89.37)^2 \} / 6 - 5021.6901$$

$$= 47.7153$$

として求められる。同様にその他の制御因子の効果も求め、分散分析したものが表9である。

表9 成形条件の評価のための分散分析表

因子	平方和 S	自由度 f	分散 V	寄与率 ρ
A	421.56	1	421.56	3.23
B	47.71	2	23.85°	—
A × B	4637.15	2	2318.57	43.27
C	2775.31	2	1387.33	25.27
D	49.95	2	24.97°	—
E	20.44	2	10.22°	—
F	966.62	2	483.31	7.65
G	595.39	2	297.69°	—
H	793.36	2	396.68	5.97
e (°印)	713.49	4	89.19	14.63
合計	10307.49	17		100

なお、本実験では全ての列に制御因子が割り付けられているために誤差の項がない。このような場合、一般的には分散値の小さいものから因子の約半数を誤差として取り扱っている。ここでは4つの因子を誤差と考えてプールした。

因子の寄与率 ρ はこの誤差の分散を用い、純変動 S' を

$$(純変動) = (平方和) - (自由度) \times (誤差分散)$$

として、

$$\rho = (純変動) / (全変動) \times 100(\%)$$

で求められる。

従って結合剤Aの場合は、

$$S'_A = S_A - 1 \times Ve = 421.56 - 89.19 = 332.37$$

$$\rho_A = S'_A / ST \times 100 = 332.37 / 10306.14 \times 100 = 3.23 (\%)$$

となり、同様にその他の因子の寄与率も求めた。以上のことから、寄与率の大きい効果は、結合剤 (PP) と可塑剤 (DBP) の交互作用、滑剤 (ステアリン酸) である。各制御因子について、水準間の転写性のSN比の傾向を図4、感度Sの傾向を図5に示した。

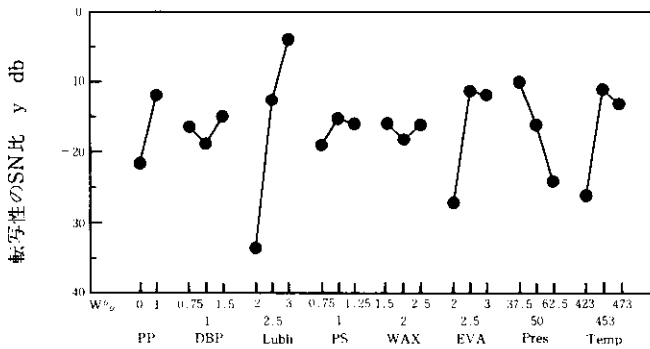


図4 制御因子毎の転写性のSN比の傾向

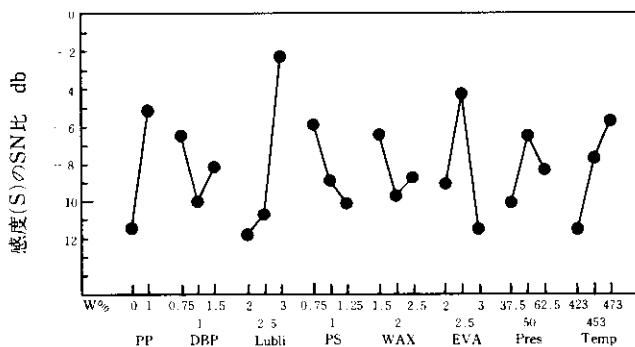


図5 制御因子毎の感度Sの傾向

制御因子毎の傾向は、図からわかるように滑剤の効果は混合量が多くなるほどSN比が高くなり、ばらつきが改善されることがわかる。以下、結合剤 (EVA)、樹脂温度、結合剤 (PP) の効果が大きい。成形時の射出圧力は低い方が転写性は良くなるが、成形時の樹脂温度は最適温度でないと転写性は悪くなる。また、結合剤 (PS)、WAXはSN比が低く、転写性への効果は低いことがわかる。

分散分析の結果、最も寄与率の大きい結合剤 (PP) と可塑剤 (DBP) の交互作用について、平均値の傾向を検討した結果を図6に示す。

図から明らかなように、Aの水準によってBの効果の現れ方が異なっており、A₂B₃の組み合わせでSN比が大きくなっている。

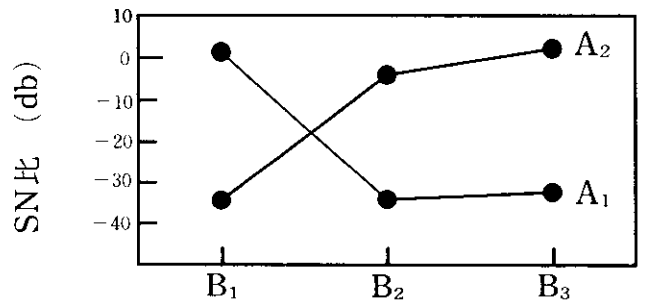


図6 交互作用 (A x B) の要因効果図

5. 最適条件の推定と確認実験

5.1 最適条件の推定

前節で述べたように、最も寄与率の大きい効果は滑剤 (ステアリン酸) であり、混合量の多い方がSN比が大きいことを示している。同様に、他の制御因子についても、SN比の大きい方の水準を選べば、その水準を組み合わせたものが転写性の良い条件となる。したがって、各制御因子について平均値の高い水準の組み合わせを選択する。ただし、A x Bの交互作用の効果が大きかったことから、因子A、Bについては図8の交互作用の図より、A₂B₃の組み合わせを最適水準として選択する。以下、図6をもとに最適な水準を選んだときの最適加工条件は、

$$A_2, B_3, C_1, D_2, E_1, F_2, G_1, H_2$$

となる。この最適加工条件で成形したときに得られるSN比の推定値 $\hat{\mu}$ を、前節で成形品の転写性に影響を与えるとした制御因子の平均値を用いて計算する。

しかし、これらの全ての条件で推定すると過大推定になると考えられるので効果の大きかったA x B、C、F、Hを用いて推定した。

$$\begin{aligned} \hat{\mu} &= A_2B_3 + C_1 + F_2 + H_2 - (3 \times SN \text{ 比の総平均}) \\ &= 2.41 + (-3.39) + (-11.24) + (-11.00) - (3 \times -16.70) \\ &= 26.28(\text{ db}) \end{aligned}$$

表10 確認実験の条件

	結合剤 PP	可塑剤 DBP	滑 ステアリン酸	結合剤 PS	WAX	結合剤 EVA	射出圧力 MPa	樹脂温度 K	アルミナ重量 (g)	バインダー 比率 (%)
	A	B	C	D	E	F	G	H	N ₁ 0.6 μ-100% N ₂ 0.4 μ-20%	
最 適 条 件	A ₂	(B ₂)	C ₁	(D ₂)	(E ₁)	F ₂	(G ₁)	H ₂	2327	10.5
	26	39	78	26	39	65	37.5	453	1861.6 (465.4)	
現 行 条 件	A ₂	B ₂	C ₂	D ₂	E ₂	F ₂	G ₂	H ₂	2340	10.0
	26	26	65	26	52	65	50	453	1880 (468)	

また、現行条件を第2水準としたときのSN比の推定値 $\hat{\mu}$ は、

$$\begin{aligned}\hat{\mu} &= A_2 + B_2 + C_2 + F_2 + H_2 - (3 \times \text{SN比の総平均}) \\ &= -3.81 + (-12.57) + (-11.24) + (-11.00) - (3 \times -16.70) \\ &= 11.48 \text{ (db)}\end{aligned}$$

これより、推定における利得は、

$$\begin{aligned}\text{最適条件 } \hat{\mu} - \text{現行条件 } \hat{\mu} &= 26.28 - 11.48 \\ &= 14.80 \text{ (db)}\end{aligned}$$

となる。

5. 2 確認実験

実験結果の再現性を検討するために、表10に示した材料の組み合わせおよび成形条件を最適条件とし、現行条件は第2水準の組み合わせを採用し、確認実験を行った。混練条件等その他については、前記した条件と同じである。確認実験の結果を表11に示した。

表11 SN比の推定値と確認実験の結果

	推 定 値 (db)	確認実験 (db)
最適条件	26.28	15.68
現行条件	11.48	14.07
利 得	14.80	1.61

確認実験の結果、最適条件は現行条件に比べ、わずかながら転写性の向上がみられた。ただし推定値と確認実験では利得の一致が必ずしも良いとは言えない結果になった。この原因としては、各行においてN₁、N₂で各2個の合計4個を試験片としたが、材料の組み合わせにより試験片が成形できなかった行(11, 15行目)、脱脂・焼結工程において割れが発生し、試験片個数が不足した行(3, 4, 7, 9, 10, 18行目)、またショートショットで測定ヶ所の少ない行(5, 6, 8, 12行目)があったため、これらの測定データの処理方法が影響したものと考えられる。

さらに今回のリップ付きモデル成形品の実験で得られた最適条件を用いて、木村ら³⁾の実験に用いた立体斜め構造を持つモデル成形品を成形し、転写性のSN比の比較を行った。今回の実験の最適条件では19.77 dbの結果が得られ、木村らの確認実験の結果である18.95 dbより、0.82 db良い結果となった。これらのことから、今回の最適条件が別の成形

品の最適条件として、共通的に使用できる可能性が示されたといえる。

6. 結 言

本実験は、品質工学を理解することを主たる目的とし、ファインセラミックスの射出成形の基礎的研究を通して、リップ付きモデル成形品の成形条件の最適化について検討した。そこでは新しい評価尺度である転写性を用いて検討した。その結果、次のことが明らかになった。

- ①結合剤と可塑剤の交互作用が大きく、結合剤と可塑剤の効果が条件により変化することが明らかになった。
- ②射出成形の転写性から判断すると、バインダーでは滑剤(ステアリン酸)の効果が大きく、混合量が多くなるほどSN比は大きくなる。
- ③成形時の射出圧力は、低い方が転写性は良くなる。
- ④成形時の樹脂温度は高い方が転写性は良いが、高すぎると悪くなり、最適温度が存在する。
- ⑤バインダー比率とSN比の関係では、比率の影響ではなく、種類(成分)が大きく影響する。
- ⑥今回求めた最適条件は成形品形状が異なっても、ある程度の適合性が確保できる。

最適条件の推定では、転写性の利得が大きく求められたが、確認実験の結果と比較すると一致していない。これは今回の実験において成形の難しいバインダー比率の小さい範囲にチャレンジしたため成形不良等により、完全なデータが得られなかったことに原因があると思われる。不完全データの解析方法についての検討が今後の課題である。

最後に本研究を進めるにあたり、実験の進め方、データの解析等についてご指導いただきました計量研究所計測数理研究室の皆様、金型に関し、ご協力いただきました朝日ナショナル照明(株)の木村安広氏に深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 長屋喜八ら：合成樹脂, 34, 6 (1988), 35, 1 (1989)
- 2) 中小企業庁, 計量研究所：国立機関技術開発事業成果普及発表テキスト (1992)
- 3) 木村安広ら：成形加工, 297 (1992)