

樹脂流動解析による金型設計および成形技術の 高度化に関する研究（第 2 報）

生産技術部

中野太郎 田中徹

本研究は、樹脂流動解析を駆使した効率的な製品開発支援により、樹脂成形品の高品質化・低コスト化を短期間に達成する最適化手法を開発することを目的とする。昨年度は、樹脂流動解析の解析精度を向上させるために、応答曲面法によるパラメータのチューニングを実施し、その改善効果を確認した。本年度は、応答曲面法の実験負荷を削減させる手段として、特性値に影響を与える因子を効率的に抽出する、フィッティングパラメータのスクリーニング方法について検討した。その結果、樹脂流動解析における解析パラメータの選別作業において、シャイニンメソッドを活用したスクリーニングが有効であることを確認した。

1. はじめに

樹脂製品製造に関わる生産活動のグローバル化が進み、品質・コスト両面における国際競争力の強化が緊急課題となっている。このような厳しい環境の中、製品開発の期間短縮や成形不良の問題解決に寄与するものとして、樹脂流動解析が注目されている。

コンピュータによる樹脂流動解析技術は近年めざましい発展を遂げ、金型設計などに積極的に利用されるようになってきたが、より高い精度で事前予測を行うには、複数の実験での実測結果とシミュレーション結果が一致するよう、様々な解析パラメータを微調整して解析結果を合わせ込む必要がある。しかしながら、これらの調整作業には専門的な知識が要求される¹⁾ため、高度な技術やノウハウを有する解析技術者でなければ、樹脂流動解析システムを十分に使いこなすことができないという課題がある。

本研究では、経験の少ないオペレータでも樹脂流動解析結果と実験計測結果の整合性を向上させる最適な合わせ込みを容易に達成できるよう、標準化された樹脂物性パラメータチューニング手法の開発を行う。

本年度は、応答曲面法を用いたパラメータチューニングにおける実験負荷を削減する手段として、特性値に影響を与える因子を効率的に抽出するためのスクリーニング方法について検討した。

2. 応答曲面法の課題

応答曲面とは n 個の予測変数 $x_i (i = 1 \cdots n)$ から推定される応答 y を近似式で表現したものである^{2,3)}。回帰係数を β とし、応答関数を 2 次多項式近似した

場合、応答曲面は式 (1) で与えられる。

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

応答曲面の導入により、因子との複雑な関係から成り立つ特性値を、単純な多項式に置き換えて簡便に取り扱うことができるようになるため、応答曲面法はパラメータの最適化において広く用いられている手法である。昨年度の研究報告⁴⁾においても、応答曲面関数で近似した樹脂流動解析の特性値を、Microsoft 社 Excel のソルバー機能を用いて最適化し、その有効性を確認した。しかし、式 (1) に示すような n 個のパラメータを有する応答曲面の場合、応答曲面式を求める（回帰係数 β を推定する）ために必要な実験の回数は、定数項、1 次項、2 次項、1 次の積項の項数の和に等しく、式 (2) に示すように、その総和 N がパラメータの数に伴い急激に増加するという課題がある。

$$\begin{aligned} N &= 1 + n + n + n C_2 \\ &= \frac{n^2 + 3n + 2}{2} = \frac{(n+1)(n+2)}{2} \quad (2) \end{aligned}$$

このように、必要な実験回数の増減にパラメータの数が二乗で影響するため、取り上げるパラメータの事前選別（スクリーニング）を高い精度で実施することが、パラメータチューニングの効率化にとって重要かつ効果的である。特に、樹脂流動解析のように、多くの状態方程式や物性値を使用するシミュレーションの場合、数十ものパラメータに関する検討が要求されることもあり、スクリーニングの問題はより深刻になってくる。

3. スクリーニング方法の検討

3.1 シャイニンメソッドの利用

効率的なスクリーニングを実現するために、シャイニンメソッド(変数探索法)の利用を検討する。シャイニンメソッドとは、Dorian Shainin が提唱する品質管理を目的とした解析手法のことで、米国において広く使用されている実験計画である⁵⁾。日本ではあまり実例が無いようなので、ここでは、その概要や解析手順について簡単に説明する。

3.2 シャイニンメソッドの特徴

スクリーニング作業の効率化を図る際、一般的には直交表を利用した実験計画法などを用いることが多いが、直交表を使う実験計画の場合、推定の対象となる因子の選定や、直交表への割り付けを実験前に決定しなければならないという制約がある。実験後に特定の因子や交互作用に関する調査を追加することができないため、必要な情報の取りこぼしを防ぐには、あらかじめ大きめの実験計画を実施するなどの対策が必要である。

これに対し、シャイニンメソッドは、まず主効果の推定を行った後、その結果を受けて、任意の因子間交互作用について追跡調査を行うことができる。必要な交互作用のみを選択的に調査することで、実験規模の過剰な拡大を避けることができるため、状況によっては実験回数を大幅に削減できる可能性がある。

3.3 シャイニンメソッドの解析手順

3.3.1 モデル式の定義

スクリーニング段階では、各パラメータが特性値にどの程度影響を与えているか分かれば十分なので、3 因子以上の交互作用を無視したモデルを想定し、2 水準系の実験計画としてシャイニンメソッドの適用を考える。

β_0 を一般平均、 β_i を因子の主効果、 β_{ij} を 2 因子交互作用とするとき、モデル式は式 (3) となる。

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (3)$$

3.3.2 段取・交換試行

シャイニンメソッドによる推定作業は、主効果の抽出と交互作用の抽出の 2 つの段階に分けることができる。最初の段階である段取・交換試行において主効果の推定を行う。

段取・交換試行の実験計画を表 1 に示す。表中の「-1」は各因子の第 1 水準、「+1」は第 2 水準に対応している。まず因子の水準を片側に統一した段取試行を行い、その後、各因子(因子 1, 因子 2, …, 因子 n) の水準のみを入れ替えた交換試行を行う。因

子数が n のとき、段取試行と交換試行を合わせた実験回数は 2n+2 回となる。

実験番号 No.1 での特性値の期待値は式 (4) となる。

$$E[y_1] = \beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n + \beta_{12} + \beta_{13} + \dots \quad (4)$$

一方、因子 1 に関する交換試行 No.3 での特性値の期待値は式 (5) となる。

$$E[y_3] = \beta_0 - \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n - \beta_{12} - \beta_{13} - \dots \quad (5)$$

ここで、式 (4) と式 (5) の差から式 (6) を得る。

$$E[y_1] - E[y_3] = 2\beta_1 + 2\beta_{12} + 2\beta_{13} + \dots \quad (6)$$

式 (6) において主効果で残るのは β_1 のみであるが、因子 1 に関わる 2 因子交互作用が交絡してしまっている。そこで、さらに主効果の推定を進めるために、同様の計算を実験番号 No.2 と No.3 で実施し、式 (7) を得る。

$$E[y_2] - E[y_4] = -2\beta_1 + 2\beta_{12} + 2\beta_{13} + \dots \quad (7)$$

このとき、式 (6) と式 (7) の差をとると

$$E[y_1] - E[y_3] - E[y_2] + E[y_4] = 4\beta_1$$

$$\beta_1 = \frac{1}{4}(E[y_1 - y_3 - y_2 + y_4]) \quad (8)$$

となり、主効果を表す β_1 が式 (8) から求められる。他の因子の主効果も同様に求めることができる。

3.3.3 仕上試行

続いて、仕上試行において交互作用を求める。因子 1 と因子 2 の交互作用について求める場合、表 1 に示す実験計画に加え、因子 1, 2 に関わる仕上試行(段取試行の因子 1 と因子 2 の水準を逆にしたもの)を追加で実施する。追加される仕上試行を表 2 に示す。

表 1 段取・交換試行の実験計画

No.	試行	1	2	3	4	...	n
1	段取	+1	+1	+1	+1	...	+1
2	試行	-1	-1	-1	-1	...	-1
3	交換試行	-1	+1	+1	+1	...	+1
4	因子 1	+1	-1	-1	-1	...	-1
5	交換試行	+1	-1	+1	+1	...	+1
6	因子 2	-1	+1	-1	-1	...	-1
⋮	⋮				⋮		
2n+1	交換試行	+1	+1	+1	+1	...	-1
2n+2	因子 n	-1	-1	-1	-1	...	+1

表 2 仕上試行の実験計画

No.	試行	1	2	3	...	n
p*+1	仕上試行	-1	-1	+1	...	+1
p+2	因子 1,2	+1	+1	-1	...	-1
⋮	⋮			⋮		

*1 表 1 に示す段取・交換試行の後に実施するので、実際の実験番号は p に 2n+2 を代入した値となる

表 1, 表 2 に示す実験番号 No.5, 6, p+1, p+2 での特性値の期待値は次のようになる。

$$E[y_5] = \beta_0 + \beta_1 - \beta_2 + \beta_3 + \dots - \beta_{12} + \beta_{13} + \dots$$

$$E[y_6] = \beta_0 - \beta_1 + \beta_2 - \beta_3 - \dots - \beta_{12} + \beta_{13} + \dots$$

$$E[y_{p+1}] = \beta_0 - \beta_1 - \beta_2 + \beta_3 + \dots + \beta_{12} - \beta_{13} - \dots$$

$$E[y_{p+2}] = \beta_0 + \beta_1 + \beta_2 - \beta_3 - \dots + \beta_{12} - \beta_{13} - \dots$$

このとき

$$E[y_{p+1}] - E[y_5] = -2\beta_1 + 2\beta_{12} - 2\beta_{13} - \dots \quad (9)$$

$$E[y_{p+2}] - E[y_6] = 2\beta_1 + 2\beta_{12} - 2\beta_{13} - \dots \quad (10)$$

であるため、式 (6), (7), (9), (10) の総和を取ると式 (11) となり、因子 1 と 2 の交互作用のみを抽出することができる。

$$\beta_{12} = \frac{1}{8} (E[y_1 + y_2 - y_3 - y_4 - y_5 - y_6 + y_{p+1} + y_{p+2}]) \quad (11)$$

同様に、任意の 2 因子間交互作用について、推定する 2 因子交互作用 1 つにつき 2 回の仕上試行を追加することで追跡調査を行うことができる。

4. 実験方法

4.1 スパイラルフロー試験

樹脂流動解析結果から得られる流動長を特性値とし、その特性値に対する解析パラメータの影響度を解析するためにスクリーニング試験を実施する。その際、樹脂の流れ特性を評価する方法として、スパイラルフロー試験による検討を行う。

スパイラルフロー試験に用いられる金型は、成形品の中心が樹脂の注入口となっており、これを起点とした渦巻き曲線溝が設けられている。渦巻き曲線に

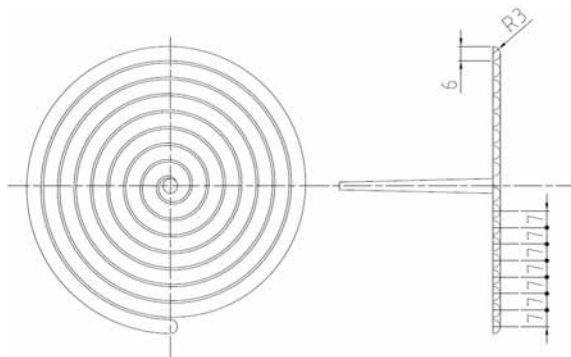


図 1 スパイラルフロー金型

は、アルキメデス螺旋という極座標の方程式 $r = a\theta$ で表される曲線が使用され、溝の間隔が一定になるという特徴がある。スパイラルフロー試験とは、この金型を射出成型機に取り付け、一定条件のもと成形試験を行い、樹脂の流れ距離によってその特性を評価する試験方法である。

本研究において、解析の対象とするスパイラルフロー試験用金型の概略図を図 1 に示す。ここでは、この金型と同じ形状の解析モデルを用いて樹脂流動解析を行い、解析結果に与えるパラメータの影響度について、スクリーニングを実施する。

4.2 流動長計測方法

スパイラルフロー試験の樹脂流動長計測には、アルキメデススパイラル長の計測に特化した流動長解析ソフトウェアを作成して対応した。ソフトウェアの開発には C++ 言語を用い、GUI フレームワークとして Nokia 社 Qt4.8.0 を利用した。

流動長解析ソフトウェアの実行画面を図 2 に示す。流動長の解析対象となる成形品の撮影画像、もしくは樹脂流動解析結果画像をソフトウェアに読み込み、成形品の中心位置とフローフロント先端位置を指定して流動長を解析する。位置の指定は画面上をクリックすることで行う。図 2 中の赤い螺旋状の曲線が入力値から算出したアルキメデス螺旋である。螺旋回転角度を積算し曲線の長さを求め、流動長として結果を出力している。

このように、画像を用いた計測方式を採用することで、実際の成形品写真や流動解析の結果画像などから正確な樹脂流動長さを計測できるようになる。



図 2 流動長解析ソフトウェア

4.3 樹脂流動解析

解析ソフトウェア MoldflowInsight2012 (Autodesk 社製, 平成 22 年度電源立地地域対策交付金補助) を用いて樹脂流動解析を実施する. 解析条件の詳細を表 3 に示す.

4.4 パラメータの選定

樹脂流動解析において粘度は最も重要な物性の一つであり, 成形に伴う圧力の演算などに大きな影響を及ぼすとされている⁶⁾. スパイラスフロー試験を対象とした流動長の解析結果にも強く影響すると考えられるので, 樹脂の粘性を示す状態方程式に着目し, フィッティングパラメータのスクリーニング試験を行うことにした.

MoldflowInsight2012 において, 温度 T , セン断速度 $\dot{\gamma}$, および粘土 η の依存関係を示す粘土モデルは, 式 (12) に示す Cross-WLF 粘度モデル近似式でフィッティングされ計算に用いられる.

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + (\eta_0 \dot{\gamma} / \tau^*)^{1-n}} \quad (12)$$

$$\eta_0 = D_1 \exp \left[\frac{-A_1(T - D_2)}{A_2 + (T - D_2)} \right]$$

ここで, n , τ^* , A_1 , A_2 , D_1 , および D_2 は樹脂毎に異なるデータフィッティング係数である. これらの係数の中から, 樹脂の流動性に大きな影響を与えるパラメータを抽出するために, スクリーニング試験を行う.

フィッティングパラメータの水準表を表 4 に示す. 前述したように要因の効果を確認することが目的なので 2 水準に設定する. 現行の設定値を第 1 水準に取り, 第 1 水準の値を 1% 増加させた数値を第 2 水準とした.

表 3 樹脂流動解析条件

樹脂流動解析ソフト ワークステーション	Autodesk 社 MoldflowInsight2012 HP 社 (Windows7 64bit)
解析順序	充填+保圧
樹脂材料	T 社製 PBT
金型温度	80 °C
樹脂温度	260 °C
保圧/保持制御	30MPa - 10sec
冷却時間	20sec
メッシュタイプ	3D メッシュ
グローバルエッジ長	2mm
要素数	244835 個

4.5 実験計画

フィッティングパラメータを割り付けたシャイニンメソッドによる実験計画のうち, 段取・交換試行の計画を表 5 に, 仕上試行の計画を表 6 に示す.

段取・交換試行において主効果の推定に必要な実験回数は, 因子数を n とすると $2n+2$ 個である. ここでは取り扱う因子数が 6 個なので計 14 回の解析回数となる. 続いて 2 因子交互作用を求めるために仕上試行を行う. その際, 調査する 2 因子交互作用の組み合わせ 1 つにつき 2 回の追加実験を行う. 因子数が 6 個の場合, 2 因子交互作用の組み合わせは ${}_6C_2$ で 15 通りなので, すべての交互作用を追跡調査するために, 30 回の解析を追加する.

さらに, 実験規模と得られる解析結果の精度について比較するため, 分解能の異なる実験計画も併せて実施する. 実験計画の分解能と推定可能な因子の関係については表 7 に示す⁷⁾.

実験計画の分解能は, 実験規模が大きいほどより詳細に解析できる傾向にある. 直交表を用いて 6 個の因子を解析する場合, Resolution III の計画 (L_8) で 8 回, Resolution IV の計画 (L_{16}) で 16 回, Resolution V の計画 (L_{32}) で 32 回の解析が必要となる. これら 3 つの, 分解能の異なる直交表実験を平行して実施し, シャイニンメソッドから得られる結果との比較を行う.

表 4 フィッティングパラメータの水準表

因子		第 1 水準	第 2 水準	単位
因子 A	τ^*	2.500E+05	2.525E+05	[Pa]
因子 B	D_1	6.900E+01	6.969E+01	[Pa·s]
因子 C	D_2	5.200E+01	5.252E+01	[k]
因子 D	A_1	2.820E+25	2.848E+25	[-]
因子 E	A_2	3.630E+02	3.666E+02	[k]
因子 F	n	3.600E-01	3.636E-01	[-]

表 5 シャイニンメソッド (段取・交換試行)

段取・交換試行の実験計画表							
No	A因子 τ^*	B因子 D_1	C因子 D_2	D因子 A_1	E因子 A_2	F因子 n	
1	1	1	1	1	1	1	段取試行
2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	段取試行
3	-1	1	1	1	1	1	交換試行
4	1	-1	-1	-1	-1	-1	交換試行
5	1	-1	1	1	1	1	交換試行
6	-1	1	-1	-1	-1	-1	交換試行
7	1	1	-1	1	1	1	交換試行
8	-1	-1	1	-1	-1	-1	交換試行
9	1	1	1	-1	1	1	交換試行
10	-1	-1	-1	1	-1	-1	交換試行
11	1	1	1	1	-1	1	交換試行
12	-1	-1	-1	-1	1	-1	交換試行
13	1	1	1	1	1	-1	交換試行
14	-1	-1	-1	-1	-1	1	交換試行

表 6 シャイニンメソッド (仕上試行)

仕上試行の実験計画表

No	A因子	B因子	C因子	D因子	E因子	F因子	
	τ^*	D1	D2	A1	A2	n	
15	-1	-1	1	1	1	1	仕上試行
16	1	1	-1	-1	-1	-1	仕上試行
17	-1	1	-1	1	1	1	仕上試行
18	1	-1	1	-1	-1	-1	仕上試行
19	-1	1	1	-1	1	1	仕上試行
20	1	-1	-1	1	-1	-1	仕上試行
21	-1	1	1	1	-1	1	仕上試行
22	1	-1	-1	-1	1	-1	仕上試行
23	-1	1	1	1	1	-1	仕上試行
24	1	-1	-1	-1	-1	1	仕上試行
25	1	-1	-1	1	1	1	仕上試行
26	-1	1	1	-1	-1	-1	仕上試行
27	1	-1	1	-1	1	1	仕上試行
28	-1	1	-1	1	-1	-1	仕上試行
29	1	-1	1	1	-1	1	仕上試行
30	-1	1	-1	-1	1	-1	仕上試行
31	1	-1	1	1	1	-1	仕上試行
32	-1	1	-1	-1	-1	1	仕上試行
33	1	1	-1	-1	1	1	仕上試行
34	-1	-1	1	1	-1	-1	仕上試行
35	1	1	-1	1	-1	1	仕上試行
36	-1	-1	1	-1	1	-1	仕上試行
37	1	1	-1	1	1	-1	仕上試行
38	-1	-1	1	-1	-1	1	仕上試行
39	1	1	1	-1	-1	1	仕上試行
40	-1	-1	-1	1	1	-1	仕上試行
41	1	1	1	-1	1	-1	仕上試行
42	-1	-1	-1	1	-1	1	仕上試行
43	1	1	1	1	-1	-1	仕上試行
44	-1	-1	-1	-1	1	1	仕上試行

表 7 実験計画の分解能と推定可能な因子の関係

Resolution III 型	Resolution IV 型	Resolution V 型
2 因子以上の交互作用を考慮しない場合	3 因子以上の交互作用を考慮しない場合	3 因子以上の交互作用を考慮しない場合
全ての主効果が推定可能	全ての主効果が推定可能	全ての主効果と 2 因子交互作用が推定可能

5. 結果および考察

5.1 推定結果

シャイニンメソッドにより得られた解析結果のうち、主効果に関する結果を表 8 に、2 因子交互作用に関するものを表 9 に示す。また、Resolution III (L_8)、Resolution IV (L_{16})、Resolution V (L_{32}) の実験計画と解析結果を表 10、表 11、表 12 に示す。表中の A~E は水準表 (表 4) の因子に対応しており、アルファベット 2 文字のものは 2 因子交互作用を示している。さらに、これらすべての結果を 1 つのグラフにまとめたものを図 3 に示す。

5.2 主効果の推定

主効果は、 L_8 、 L_{16} 、 L_{32} 、シャイニンメソッド (実験回数 14 回) いずれの実験計画においても推定可能である。概ねどの実験計画も同じ傾向を示しているが、Resolution III の計画 (L_8) において、その推定値の大きさが他の実験結果から大きく外れているのが見られた。実験計画の分解能が低く、2 因子以上の交互作用が交絡した影響が出ていると考えられる。

表 8 シャイニンによる主効果の推定結果

主効果	平均水準		要因効果	
	水準 1	水準 2	水準 1	水準 2
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1 A	354.9	347.3	3.805	-3.805
2 B	364.6	357.8	3.433	-3.433
3 C	382.9	340.4	21.26	-21.26
4 D	332.3	390.5	-29.11	29.11
5 E	369.1	348.4	10.38	-10.38
6 F	367.3	348.5	9.405	-9.405

表 9 シャイニンによる交互作用の推定結果

交互作用	平均水準		要因効果	
	水準 1	水準 2	水準 1	水準 2
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1 AB	357.6	357.4	0.108	-0.108
2 AC	360.9	357.8	1.525	-1.525
3 AD	357.3	357.6	-0.175	0.175
4 AE	360.9	354.9	2.958	-2.958
5 AF	360.2	354.1	3.046	-3.046
6 BC	363.2	367.9	-2.370	2.370
7 BD	360.2	367.7	-3.778	3.778
8 BE	361.1	365.1	-1.978	1.978
9 BF	355.9	364.2	-4.140	4.140
10 CD	362.3	368.2	-2.945	2.945
11 CE	365.2	365.5	-0.145	0.145
12 CF	360.2	364.6	-2.224	2.224
13 DE	355.1	365.3	-5.094	5.094
14 DF	361.0	364.5	-1.715	1.715
15 EF	361.8	361.8	0.002	-0.002

5.3 交互作用の推定

Resolution IV の実験計画 L_{16} は、一部の交互作用について推定可能である。ただし、交互作用の割り付けを事前に行う必要があるため、主効果の大きさを確認した後に因子を選定することは出来ない。ここでは表 11 に示すように、因子 A に関わる交互作用のみを事前に直交表に割り付けた。

水準表 (表 4) の 6 因子に関わる全ての 2 因子交互作用を推定したい場合は、Resolution IV の L_{32} を採用するか、仕上試行を含んだシャイニンメソッドを実施する。この時、シャイニンメソッドの実験回数は総計で 44 回となる。

図 3 において、Resolution IV (L_{16})、Resolution V (L_{32})、シャイニンメソッド (実験回数 44 回) から推定された交互作用を比較すると、実験計画の違いにより傾向が逆転している交互作用が幾つかみられるが、推定値の大きさが極端に異なるような結果にはなっていない。ある程度の影響度を事前に調査するというスクリーニングの目的の範囲内であれば、シャイニンメソッドでも十分な精度が得られたと判断できる。

表 10 実験計画 Resolution III (L_8)

列	割付	平均		要因効果	
		水準 1 [mm]	水準 2 [mm]	水準 1 [mm]	水準 2 [mm]
1	A	366.0	363.4	1.286	-1.286
2	B	370.9	358.5	6.201	-6.201
3	E	366.4	363.0	1.691	-1.691
4	C	376.0	353.4	11.30	-11.30
5	F	365.8	363.7	1.051	-1.051
6		365.4	364.0	0.716	-0.716
7	D	331.6	397.9	-33.14	33.14

表 12 実験計画 Resolution V(L_{32})

列	割付	平均		要因効果	
		水準 1 [mm]	水準 2 [mm]	水準 1 [mm]	水準 2 [mm]
1	A	360.1	359.4	0.340	-0.340
2	B	361.1	358.4	1.316	-1.316
3	AB	359.6	359.9	-0.153	0.153
4	C	373.2	346.3	13.50	-13.50
5	AC	360.7	358.8	0.911	-0.911
6	BC	358.2	361.3	-1.543	1.543
7	DE	356.7	362.8	-3.066	3.066
8	D	329.1	390.4	-30.61	30.61
9	AD	361.0	358.5	1.274	-1.274
10	BD	359.4	360.1	-0.352	0.352
11	CE	357.2	362.3	-2.591	2.591
12	CD	359.7	359.8	-0.028	0.028
13	BE	362.5	357.0	2.761	-2.761
14	AE	359.8	359.7	0.054	-0.054
15	E	365.4	354.1	5.607	-5.607
16	F	358.4	361.1	-1.344	1.344
17	AF	363.9	355.6	4.154	-4.154
18	BF	358.6	361.0	-1.201	1.201
19		361.3	358.2	1.505	-1.505
20	CF	358.8	360.7	-0.964	0.964
21		360.5	359.0	0.762	-0.762
22		360.8	358.7	1.064	-1.064
23		360.8	358.7	1.037	-1.037
24	DF	360.5	359.0	0.750	-0.750
25		357.9	361.6	-1.829	1.829
26		360.8	358.7	1.066	-1.066
27		361.8	357.7	2.088	-2.088
28		360.0	359.5	0.276	-0.276
29		358.0	361.5	-1.707	1.707
30		359.2	360.3	-0.559	0.559
31	EF	360.8	358.7	1.003	-1.003

表 11 実験計画 Resolution IV(L_{16})

列	割付	平均		要因効果	
		水準 1 [mm]	水準 2 [mm]	水準 1 [mm]	水準 2 [mm]
1	A	360.2	361.2	-0.499	0.499
2	B	365.5	355.9	4.820	-4.820
3	AB	358.1	363.3	-2.630	2.630
4	C	373.9	347.5	13.24	-13.21
5	AC	361.4	360.0	0.669	-0.669
6	AD	359.7	361.7	-1.013	1.013
7	D	331.3	390.1	-29.36	29.36
8	E	367.5	353.9	6.787	-6.787
9	AE	358.7	362.7	-2.010	2.0106
10	AF	363.6	357.8	2.856	-2.856
11	F	362.8	358.6	2.113	-2.113
12		360.1	361.3	-0.584	0.584
13		359.8	361.6	-0.909	0.909
14		363.2	358.2	2.467	-2.467
15		357.6	363.8	-3.108	3.108

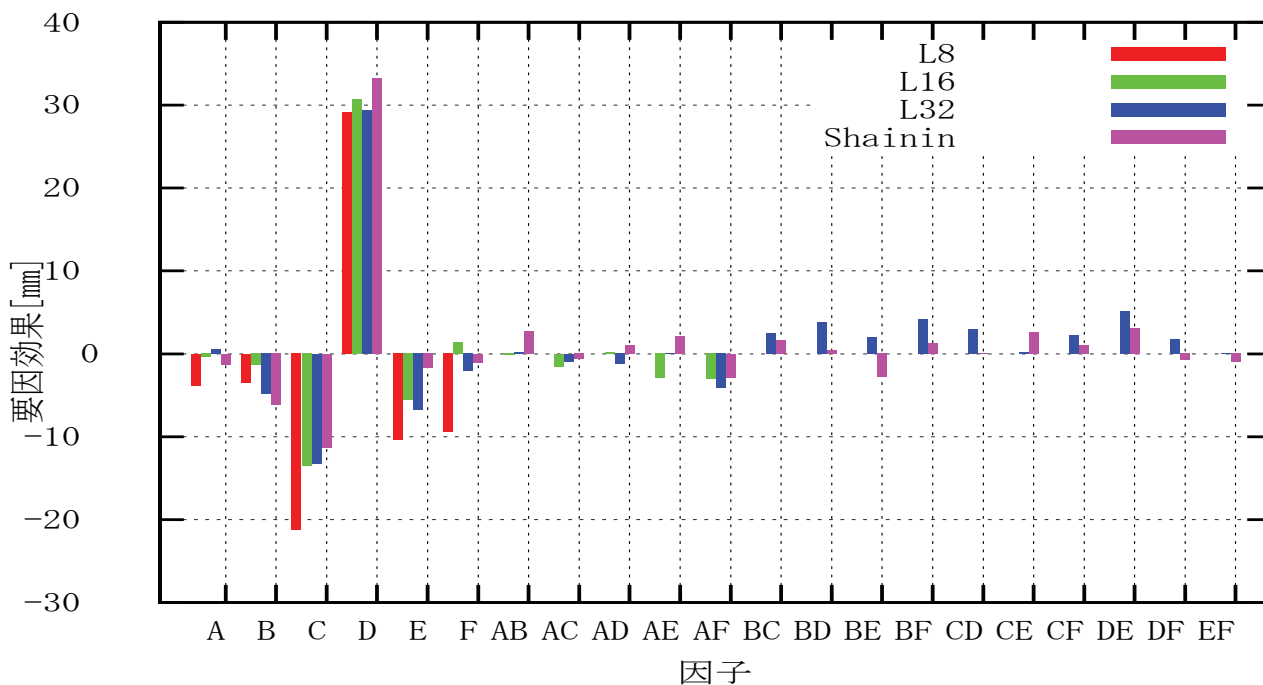


図 3 推定結果の比較

5.4 考察

今回のように、すべての 2 因子交互作用に関する推定を行う場合、シャイニンメソッドを用いても実験回数の削減には結びつかないため、当該手法を利用するメリットは少ない。しかし、実際のスクリーニング作業において、すべての 2 因子間交互作用について追跡調査を行う必要性が生じることは稀であると推測される。たとえば、主効果が大きい物同士の交互作用は、スクリーニング後の応答曲面によるチューニング段階でより詳細に調査するので、ここで追跡調査する必要は無い。さらに、主効果が小さい物同士の交互作用は、スクリーニングにおいて取りこぼしたとしても、モデル式の定数項にしか影響を及ぼさないため、パラメータの最適化や極値探索において深刻な問題には発展しないと考えられる。このように、追跡調査の優先順位を検討し、交互作用を選択的に推定することで、必要な実験回数を削減していくことが可能である。

直交表を用いて Resolution V の実験を行う場合、因子数が 6 個だと L_{32} (32 回実験)、8 個だと L_{64} (64 回実験)、10 個だと L_{128} (128 回実験) と、因子数と共に必要な実験回数も大幅に増加する。このように多くの因子を取り扱う大規模な実験計画になる程、交互作用を選択的に推定可能なシャイニンメソッドによる実験回数の削減効果が期待できる。

6. おわりに

本年度は、パラメータチューニングにおける実験負荷を削減する手段として、特性値に影響を与える因子を効率的に抽出するためのスクリーニング方法について検討した。その結果、直交表を用いた Resolution III, Resolution IV, Resolution V の実験計画と、シャ

イニンメソッドを利用したスクリーニングの解析結果を比較検証し、シャイニンメソッドがスクリーニングという使用目的に対して十分な検出能力を有していることを確認した。さらに、シャイニンメソッドを利用する際、追跡調査の優先順位を考慮し、選択的に交互作用を推定することで、効率的にスクリーニングの実験回数を削減できる可能性があることを明らかにした。

今後は、射出成型機を用いた成形試験結果との整合性を確認しながら、更なる樹脂流動解析の精度向上を目指し、より複雑な解析パラメータを対象とした近似式のフィッティングを実施する予定である。

参考文献

- 1) 吉野睦 他, シミュレーションと S Q C, 日本規格協会, 2009, p.40-42.
- 2) 轟章, 応答曲面法, <http://www.todoroki-lab.net/response/responsesurface.pdf>
- 3) 大塚裕俊 他, 高硬度金型材のエンドミル加工 (第 6 報), 平成 14 年度大分県産業科学技術センター研究報告, 2002, p.57-62.
- 4) 中野太郎, 田中徹, 樹脂流動解析による金型設計および成形技術の高度化に関する研究, 平成 22 年度佐賀県工業技術センター研究報告書, 2010, No.19, p.9-13.
- 5) 宮川雅巳, 実験計画法特論, 日科技連出版社, 2006, p.125-144.
- 6) 日本塑性加工学会, 流動解析 - プラスチック成形, コロナ社, 2004, p.30-40.
- 7) 奥野忠一, 農業実験計画法小史, 日科技連出版社, 1994, p.116-119.