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３報）

生産技術部
中野太郎　田中徹

これまでの研究において，樹脂流動解析の解析精度を向上させる技術開発に取り組み，物性値データを用いた合わせ込みの有効性の検証や，シャイニンメソッドを活用した効率的なスクリーニング手法の検討を行ってきた．本年度は，これらの手法を駆使して選定したフィッティングパラメータを用い，樹脂材料の粘度およびPVT 特性のモデル近似式を高精度化するパラメータチューニングを実施した．その際，樹脂流動解析精度を定量的に評価するために，解析値と実測値の関係を直交多項式で近似し，展開した多項式の係数値を評価指標として利用した．その結果，金型温度 60 ℃～70 ℃という幅広い温度領域において，樹脂の流動性に関する解析精度の向上を図ることができた．さらに，流動特性について最適化した物性値データを用いて反り解析を行う事で，成形品の変形に関わる解析精度も同様に改善されることを確認した．

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，プラスチック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，より高い精度で成形結果の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値のパラメータチューニング手法を開発する．

本年度は，樹脂材料の粘度およびPVT 特性のモデル近似式を高精度化するパラメータチューニングを実施し，幅広い温度領域における樹脂流動解析精度を向上させる手法について検討した．

2. フィティングパラメータの選定

2.1 モデル近似式のフィッティング

樹脂流動解析の入力データである樹脂物性値は，シミュレーションにおける圧力や温度などの演算結果に大きな影響を及ぼすため，信頼性のある品質のよい物性値データを用いることが解析精度の向上に繋がる．ここでは，解析の演算において特に重要とされる，粘度と圧縮性に関わる樹脂物性値のモデル近似式を対象としたパラメータチューニングを行うことにした．

樹脂流動解析ソフトウェアとして 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，パラメータチューニングを実施した．

MoldflowInsight2012 において，温度 T，せん断速度 $\dot{\gamma}$，および粘土 η の依存関係を示す粘土モデルは，式 (1) に示す Cross-WLF 粘度モデル近似式として計算に用いられる．

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

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

(n，τ^*，A_1，A_2，D_1，D_2 は樹脂毎に異なる係数)

また，圧力 P，比容積 V，温度 T の関係を示す PVT 特性は，式 (2) に示す Teit 式と呼ばれる近似式として計算に用いられる．

$$V = V_0\{1 - C\ln(1 + \frac{P}{B})\} + V_1 \qquad (2)$$

$$\begin{aligned} V_0 &= b_1 + b_2(T - b_5) \\ B &= b_3 \exp\{-b_4(T - b_5)\} \\ V_1 &= b_6 \exp\{b_7(T - b_5) + b_8 P\} \end{aligned}$$

(C は定数，b_1〜b_8 は樹脂毎に異なる係数)

これら 2 つのモデル式を構成する係数の中から，樹脂流動解析結果に大きな影響を与える因子を抽出する，フィティングパラメータの選定作業（以下，スクリーニングとする）を実施した．

2.2 スクリーニング

スクリーニングにはシャイニンメソッドを用いた．スクリーニングの具体的な手順については昨年度の研究報告 [2] を参照されたい．

シャイニンメソッドを用いて，式 (1) および式 (2) の各係数が流動解析結果に与える影響度を調査した結果，特に影響が大きかった 5 つの係数 $(A_1, D_2, b_3, b_6, b_8)$ をとりあげ，解析精度を向上させるためのフィッティングパラメータとして利用することにした．選定したパラメータとその水準を表 1 に示す．現行の設定値を第 2 水準に取り，水準幅は等間隔に設定した．

表 1　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	第 3 水準	単位
A_1	68.31	69.00	69.69	[−]
D_2	361.4	365.0	368.7	$[K]$
b_3	9.738E+7	1.025E+8	1.076E+8	$[Pa]$
b_6	3.539E-7	3.725E-7	3.911E-7	$[K/Pa]$
b_8	0.0342	0.036	0.0378	$[1/K]$

3. 評価方法の検討

3.1 整合性の評価モデル

複数の実験点における樹脂流動解析の解析精度を数値化するために，図 1 のような評価モデルで実験結果とシミュレーション結果の整合性を検証する．

実験結果を実測値として横軸にとり，シミュレーションによる解析結果を予測値として縦軸にとった場合，実測値と予測値が完全に一致すれば，その結果は傾き 1，切片 0 の直線上（図 1 中の赤い破線）にプロットされる．しかし，実際にはシミュレーションの予測に誤差があるため，多くの実験点においてプロットした結果が理想直線からずれてしまう．

このときの，直線 $y = x$ からのズレ量を定量的に評価し，フィッティングパラメータを用いて理想直線に合わせ込むことができれば，樹脂流動解析の精度向上に繋がるはずである．

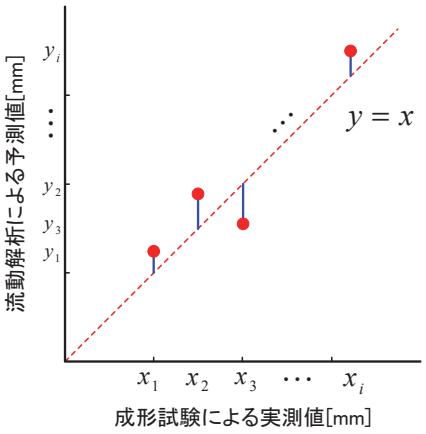

図 1　解析精度検証の評価モデル

3.2 直交多項式による近似

ここではまず，実測値と予測値の関係を近似式を用いて数値化するために，直交多項式を利用する方法 [3–5] について説明する．

説明変数 $x_i (i = 1, \cdots, n)$ から推定される目的変数を $y_i (i = 1, \cdots, n)$ とするとき，この応答の関係を N 個の関数 $\phi_k(x_i)$ $(k = 1, \cdots, N)$ の線形結合として近似する問題

$$y_i \approx \beta_1\phi_1(x_i) + \beta_2\phi_2(x_i) + \cdots + \beta_k\phi_k(x_i) \qquad (3)$$

を考える．図 1 の評価モデルにあてはめた場合，実測値が説明変数で，予測値は目的変数に相当する．

このとき，未知の回帰係数 β_k は，回帰分析により最小二乗法を用いて求めることが出来る．回帰係数の推定に用いる実験点の総数を n，誤差を ϵ とすると，その回帰モデルは行列表示で次式となる．

$$\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\epsilon} \qquad (4)$$

$$\boldsymbol{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_N \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} \phi_1(x_1) & \phi_2(x_1) & \cdots & \phi_N(x_1) \\ \phi_1(x_2) & \phi_2(x_2) & \cdots & \phi_N(x_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_1(x_n) & \phi_2(x_n) & \cdots & \phi_N(x_n) \end{bmatrix}$$

ここで，β_k の推定値を $\hat{\beta}_k$ とすると，残差平方和 S_e は次式で与えられる．

$$S_e = \boldsymbol{\epsilon}^T\boldsymbol{\epsilon} = (\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{X}\hat{\boldsymbol{\beta}})^T(\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{X}\hat{\boldsymbol{\beta}}) \tag{5}$$

さらに，S_e の $\hat{\beta}_k$ に関する停留条件から以下の式が導かれる．

$$\frac{\partial S_e}{\partial \hat{\boldsymbol{\beta}}} = -2\boldsymbol{X}^T(\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{X}\hat{\boldsymbol{\beta}}) = 0$$

$$\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X}\hat{\boldsymbol{\beta}} = \boldsymbol{X}^T\boldsymbol{Y} \tag{6}$$

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_N \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{X}^T\boldsymbol{Y} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} \phi_1(x_i)y_i \\ \sum_{i=1}^{n} \phi_2(x_i)y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{n} \phi_N(x_i)y_i \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} \phi_1(x_i)^2 & \sum_{i=1}^{n} \phi_1(x_i)\phi_2(x_i) & \cdots & \sum_{i=1}^{n} \phi_1(x_i)\phi_N(x_i) \\ \sum_{i=1}^{n} \phi_2(x_i)\phi_1(x_i) & \sum_{i=1}^{n} \phi_2(x_i)^2 & \cdots & \sum_{i=1}^{n} \phi_2(x_i)\phi_N(x_i) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^{n} \phi_N(x_i)\phi_1(x_i) & \sum_{i=1}^{n} \phi_N(x_i)\phi_2(x_i) & \cdots & \sum_{i=1}^{n} \phi_N(x_i)^2 \end{bmatrix}$$

ここで，

$$\sum_{i=1}^{n} \phi_a(x_i)\phi_b(x_i) = 0 \qquad a \neq b \tag{7}$$

という条件を満たす直交関数 $\phi_k(x_i)$ を適用することで，式 (3) は選点 x_i に関する選点直交多項式系を構成し，$\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X}$ が対角行列となる．

$\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X}$ を対角行列化することができれば，式 (6) は

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} \phi_1(x_i)^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \sum_{i=1}^{n} \phi_N(x_i)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} \phi_1(x_i)y_i \\ \sum_{i=1}^{n} \phi_2(x_i)y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{n} \phi_N(x_i)y_i \end{bmatrix} \tag{8}$$

となるため，β_k の推定値 $\hat{\beta}_k$ は

$$\hat{\beta}_k = \frac{\sum_{i=1}^{n} \phi_k(x_i)y_i}{\sum_{i=1}^{n} \phi_k(x_i)^2} \tag{9}$$

となり，実測値と予測値の関係を示す回帰曲線が多項式展開で近似される．

3.3 直交関数の適用

パラメータチューニングによって，シミュレーション結果を理想的な直線 $y = x$ に合わせ込む上で，調整作業を効率的に行うために，回帰曲線を 1 次項とそれ以外の高次項（2 次，3 次，$\cdots$，k 次の項）に展開する．その際，実測値と予測値の関係の特性上，原点を通過する関数の線形結合として近似できるので，関数 $\phi_k(x_i)$ を

$$\begin{cases} \phi_1(x_i) = x_i \\ \phi_2(x_i) = x_i^2 + c_{21}x_i \\ \phi_3(x_i) = x_i^3 + c_{31}x_i^2 + c_{32}x_i \\ \quad\vdots \\ \phi_k(x_i) = x_i^k + c_{k1}x_i^{k-1} + \cdots + c_{k(k-1)}x_i \end{cases} \tag{10}$$

として式 (3) を定義する．ここで，k は各項の次数と一致しており，c は線形結合に用いる各関数の係数を示している．

このとき，式 (7) の直交条件から，各項が直交するように係数 c を決定することで，式 (10) は選点直交関数となる．

c_{21} は，第一項と第二項の直交条件

$$\sum_{i=1}^{n} x_i(x_i^2 + c_{21}x_i) = 0 \tag{11}$$

から導かれ，

$$c_{21} = -\frac{\sum_{i=1}^{n} x_i^3}{\sum_{i=1}^{n} {x_i}^2} \tag{12}$$

となる．

c_{31}, c_{32} は，さらに，第一項と第三項，第二項と第三項の直交条件より，

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} x_i(x_i^3 + c_{31}x_i^2 + c_{32}x_i) = 0 \\ \sum_{i=1}^{n} (x_i^2 + c_{21}x_i)(x_i^3 + c_{31}x_i^2 + c_{32}x_i) = 0 \end{cases} \tag{13}$$

よって，

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} x_i^4 + c_{31}\sum_{i=1}^{n} x_i^3 + c_{32}\sum_{i=1}^{n} x_i^2 = 0 \\ c_{31}\left(\sum_{i=1}^{n} x_i^4 - \frac{(\sum_{i=1}^{n} x_i^3)^2}{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}\right) \\ \qquad + \sum_{i=1}^{n} x_i^5 - \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i^3 \sum_{i=1}^{n} x_i^4}{\sum_{i=1}^{n} x_i^2} = 0 \end{cases} \tag{14}$$

となり，式 (14) を解くことで導かれる．

このようにして求めた多項式の係数 c と式 (9)，式 (10) により，β_k の推定値 $\hat{\beta}_k$ は

$$\begin{cases} \hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i y_i}{\sum_{i=1}^{n} x_i^2} \\ \hat{\beta}_2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i^2 + c_{21}x_i)y_i}{\sum_{i=1}^{n} (x_i^2 + c_{21}x_i)^2} \\ \hat{\beta}_3 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i^3 + c_{31}x_i^2 + c_{32}x_i)y_i}{\sum_{i=1}^{n} (x_i^3 + c_{31}x_i^2 + c_{32}x_i)^2} \\ \quad\vdots \end{cases} \tag{15}$$

となる．

ここでは 3 次項までしか求めていないが，高次項の係数 c についても同様に直交条件から導出することができる．

4. パラメータチューニング

4.1 スパイラルフロー試験による流動性評価

実測値と予測値の関係を多項式展開し，定量的に評価する手法が示されたので，樹脂流動解析のパラメータチューニングにおける具体的な適用方法について検討する．

本研究では，樹脂の流動性に関する解析精度を向上させるために，樹脂流動解析結果および成形試験結果から得られる樹脂流動長を特性値としたパラメータチューニングを実施する．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った．

スパイラルフロー試験とは，渦巻き曲線溝が設けられた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，樹脂の流れた距離によって，その流動特性を評価する試験である．スパイラルフロー試験のテストピース成形実験および樹脂流動解析には，昨年度製作したアルキメデス螺旋金型 [2] と，その金型図面を元に作成した CAD データを用いた．成形条件および樹脂流動解析条件を表 2 に示す．

4.2 流動性評価試験の直交展開

幅広い温度領域における樹脂流動解析精度を向上させるために，金型温度を変えて実験を行い，評価対象となる金型温度領域全体を同時に合わせ込むパラメータチューニングを行う．

まず，金型温度 50，60，70°C の 3 つの実験点において実際にテストピースを成形し，昨年度自作した流動長解析ソフトウェア [2] を用いてテストピースの樹脂流動長を計測する．説明変数と目的変数の関係および樹脂流動長の計測結果を表 3 に示す．

この結果に対し，同じ成形条件で樹脂流動解析を行い，樹脂流動長の予測値を求めれば，実測値と予測値の関係が直交多項式で近似され，回帰係数 β_1，β_2 によって解析結果の整合性を定量的に評価できる．

4.3 直交展開のイメージ

評価の対象となる実験点が 3 ポイントなので，ここでは，2 次までの多項式による直交展開を考えることにする．2 次までの多項式を用いた直交展開のイメージを図 2 に示す．

図 2 の左のグラフに示す緑色の曲線が，選点直交関数の線形結合で近似した実測値と予測値の関係を示す回帰曲線である．この曲線を 1 次項，2 次項（3 次以降の項は無視）に展開したものが，図 2 右のグラフに示す青色の直線および曲線である．

理想的には，1 次項と 2 次項の線形結合が，直線 $y = x$ と一致することが望ましいので，この場合，回帰係数 β_1 は 1 に，β_2 は 0 になるよう合わせ込むことがパラメータチューニングに相当する．

表 2　スパイラルフロー　解析および成形条件

樹脂流動解析ソフト	Autodesk 社 MoldflowInsight2012
ワークステーション	HP 社 (Windows7 64bit)
解析順序	充填＋保圧
樹脂材料	T 社製 PBT
金型温度	50, 60, 70°C
樹脂温度	240°C
ラム速度	80mm/sec
保圧／保持制御	60MPa - 10sec
冷却時間	20sec
グローバルエッジ長	3D メッシュ - 2mm

表 3　テストピースの樹脂流動長計測結果

金型温度　[°C]	50	60	70
説明変数 x_i　[mm] (テストピースの流動長)	x_1 (332.19)	x_2 (365.25)	x_3 (395.00)
目的変数 y_i　[mm] (流動解析による予測値)	y_1	y_2	y_3

5. 結果および考察

5.1 フィッティングパラメータの分析

整合性の数値化が完了したので，続いて，フィッティングパラメータの変動に対する回帰係数 β_1，β_2 の応答について分析する．フィッティングパラメータの影響度を効率的に分析するために，L18 直交表に割り付けた実験計画を立てた．

直交表に従ったパラメータ値の組み合わせにより，18 パターンのフィッティングパラメータの組み合わ

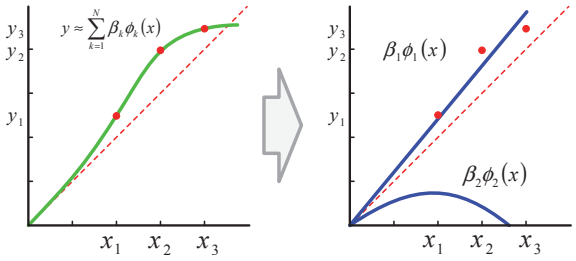

図 2　直交展開のイメージ

せが作成される．これらの物性値データを用いて樹脂流動解析を実施し，各組み合わせにおける回帰係数 β_1 および β_2 を計算した．フィッティングパラメータを割り付けた直交表および各条件における回帰係数 β_1，β_2 の計算結果を表 4 に示す．

さらに，フィッティングパラメータの影響度を詳細に解析する分散分析を行った．回帰係数 β_1 に関する分散分析を表 5 に，回帰係数 β_2 に関する分散分析表を表 6 に示す．分散分析表の F 値についている ** は，有意水準 1% で有意差があることを示している．なお，寄与が小さい因子は誤差項にプールした．

回帰係数 β_1 および β_2 に対する，各因子の効果の推定結果については図 3 に示す．

表 4　実験計画 (L_{18})

No.	A e	B b_6	C b_3	D b_8	E e	F D_2	G A_1	H e	analysis results [mm] y_1	y_2	y_3	Σx_i^2	Σx_i^3	c_{21}	$\Sigma x_i y_i$	$\Sigma(x_i^2+c_{21}x_i)y$	$\Sigma(x_i^2+c_{21}x_i)^2$	coefficient β_1	β_2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	330.56	314.52	323.96	400055	1.47E+08	-367.82	352787	-690966.8	253366805	0.882	-0.0027
2	1	1	2	2	2	2	2	2	328.26	347.83	341.75	400055	1.47E+08	-367.82	371214	-504375.5	253366805	0.928	-0.0020
3	1	1	3	3	3	3	3	3	336.81	367.11	352.01	400055	1.47E+08	-367.82	385154	-512541.7	253366805	0.963	-0.0020
4	1	2	1	1	2	2	3	3	366.11	388.96	392.64	400055	1.47E+08	-367.82	418929	-440218.9	253366805	1.047	-0.0017
5	1	2	2	2	3	3	1	1	287.8	285.41	392.49	400055	1.47E+08	-367.82	355002	572991.7	253366805	0.887	0.0023
6	1	2	3	3	1	1	2	2	370.39	391.76	387.35	400055	1.47E+08	-367.82	419285	-549779.5	253366805	1.048	-0.0022
7	1	3	1	2	1	3	2	3	326.38	334.36	323.02	400055	1.47E+08	-367.82	358272	-670741.4	253366805	0.896	-0.0026
8	1	3	2	3	2	1	3	1	392.64	402.44	417.67	400055	1.47E+08	-367.82	442563	-495029.4	253366805	1.106	-0.0020
9	1	3	3	1	3	2	1	2	305.22	289.19	304.83	400055	1.47E+08	-367.82	327551	-575622.7	253366805	0.819	-0.0023
10	2	1	1	3	3	2	2	1	350.47	358.04	353.8	400055	1.47E+08	-367.82	387091	-644834.3	253366805	0.968	-0.0025
11	2	1	2	1	1	3	3	2	337.77	361.99	357.05	400055	1.47E+08	-367.82	385594	-464873.2	253366805	0.964	-0.0018
12	2	1	3	2	2	1	1	3	307.96	326.65	311.23	400055	1.47E+08	-367.82	344672	-574247.6	253366805	0.862	-0.0023
13	2	2	1	2	3	1	3	2	386.18	392.19	408.13	400055	1.47E+08	-367.82	432902	-512113.9	253366805	1.082	-0.0020
14	2	2	2	3	1	2	1	3	289.19	327.72	298.62	400055	1.47E+08	-367.82	333839	-490711.3	253366805	0.834	-0.0019
15	2	2	3	1	2	3	2	1	307.57	328.39	366.96	400055	1.47E+08	-367.82	367191	26911.0	253366805	0.918	0.0001
16	2	3	1	3	2	3	1	2	283.02	273.35	285.53	400055	1.47E+08	-367.82	306758	-507814.0	253366805	0.767	-0.0020
17	2	3	2	1	3	1	2	3	349.77	347.97	360.71	400055	1.47E+08	-367.82	385910	-552990.1	253366805	0.965	-0.0022
18	2	3	3	2	1	2	3	1	375.57	387.79	396.93	400055	1.47E+08	-367.82	423342	-503898.4	253366805	1.058	-0.0020

表 5　分散分析表 β_1

Factor	Sum of square	Degree of freedom	Variance	F Ratio
B: b_6	6.004E-03	2	3.002E-03	2.79
C: b_3	1.595E-04	0	-	-
D: b_8	1.289E-03	0	-	-
F: D_2	2.526E-02	2	1.263E-02	11.75 **
G: A_1	1.148E-01	2	5.740E-01	53.45 **
error	1.181E-02	11	1.074E-03	
total	1.579E-01	17		

表 6　分散分析表 β_2

Factor	Sum of square	Degree of freedom	Variance	F Ratio
B: b_6	6.632E-06	2	3.316E-06	4.33
C: b_3	3.406E-06	2	1.523E-06	1.99
D: b_8	1.320E-06	0	-	-
F: D_2	5.129E-06	2	2.565E-06	3.35
G: A_1	7.234E-07	0	-	-
error	8.426E-06	11	7.660E-07	
total	2.323E-05	17		

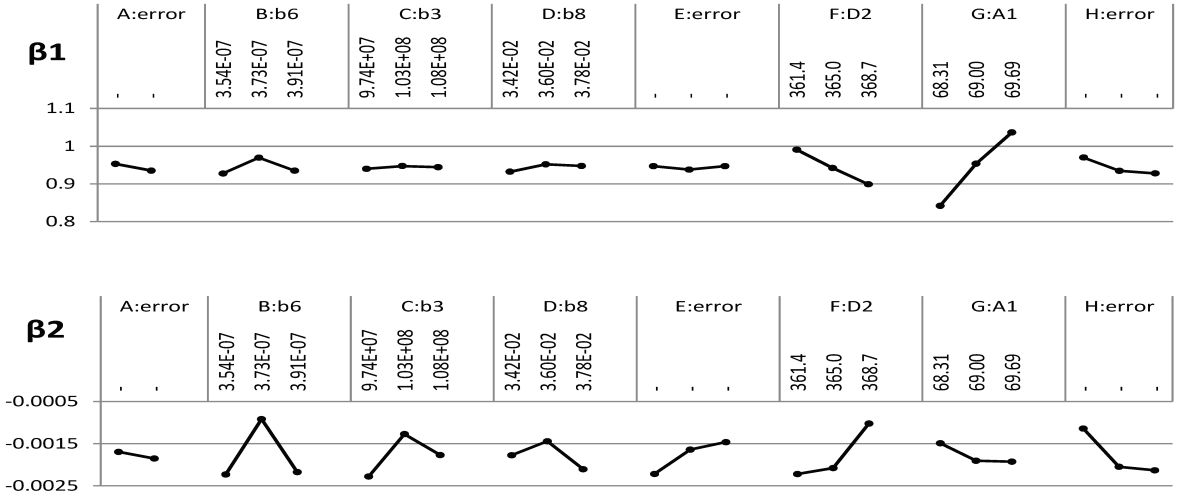

図 3　推定結果の比較

5.2 ソルバーを用いたパラメータチューニング

分散分析において有意差が認められたフィッティングパラメータ (A_1, D_2) を用いて，回帰係数 β_1 および β_2 を目標値に合わせ込むパラメータチューニングを行う．パラメータチューニングには Microsoft 社 Excel のソルバー機能を利用した．

フィッティングパラメータ (A_1, D_2) の変動に対する回帰係数 β_1，β_2 の応答は，図 3 のプロットデータを線形近似することで，その勾配として推定することができる．Excel のソルバー機能の設定項目において，この勾配値を変化率として入力し，目標値として β_1 が 1 に β_2 が 0 に近づくよう項目を設定して演算を行った．なお，フィッティングパラメータの水準の変動幅は表 1 に示した水準表の範囲内に留め，外挿データにより解析の信頼性が低下しないよう留意した．

5.3 パラメータチューニングの効果

パラメータチューニング前後におけるスパイラルフロー試験の樹脂流動長計測結果と回帰係数 β_1，β_2 を比較したものを表 7 に示す．また，流動解析結果画像と実際に成形したテストピースの比較画像を図 4 に示す．

パラメータチューニングにより，回帰係数 β_1，β_2 が目標値の 1 と 0 にそれぞれ近づいている．また，比較画像から，金型温度 60〜70°C 領域において，成形結果とパラメータチューニング後の解析結果が良く一致していることが分かる．

表 7　スパイラルフロー試験　流動長計測結果

金型温度	樹脂流動解析結果 チューニング前	樹脂流動解析結果 チューニング後	テストピース 実測値
50 [°C]	332.19[mm]	364.97[mm]	332.60[mm]
60 [°C]	330.83[mm]	374.13[mm]	365.25[mm]
70 [°C]	352.14[mm]	393.67[mm]	395.00[mm]
β_1 推定値	0.9259	1.0337	-
β_2 推定値	-0.00167	-0.00159	-

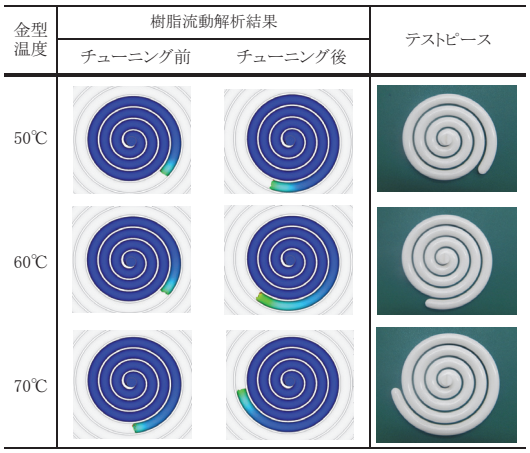

図 4　スパイラルフロー試験　結果画像

5.4 反り解析による検証

5.4.1 成形品の形状評価

樹脂流動長の予測値が，実際の成形結果と一致するようパラメータチューニングした物性値データを用いて，収縮やひけといった成形品の変形量を予測する反り解析を行う．その結果に対し，同じ条件で実際に成形した樹脂製品の計測寸法を照らし合わせ，樹脂の流れ特性に関するパラメータチューニングが，形状変化に関わる解析精度の向上に効果があるか比較検証する．

5.4.2 反り解析方法

反り解析の解析精度を検証するために船底型の金型を用いた成形実験および反り解析を実施した．反り解析に用いる金型形状のデータには，成形実験に使用する船底型の金型を三次元測定機（ミツトヨ社製 LEGEX9106，平成 23 年度電源立地地域対策交付金）で計測し，その計測結果を基に作成した高精度な CAD データを利用した．反り解析条件および成形条件を表 8 に，金型寸法を計測する様子とその計測値を元に作成した CAD データを図 5 に示す．

表 8　船底型成形品　解析および成形条件

樹脂流動解析ソフト	Autodesk 社 MoldflowInsight2012
ワークステーション	HP 社 (Windows7 64bit)
解析順序	充填＋保圧＋反り
樹脂材料	T 社製 PBT
金型温度	60°C
樹脂温度	240°C
ラム速度	80mm/sec
保圧／保持制御	40MPa - 10sec
冷却時間	15sec
グローバルエッジ長	3D メッシュ - 1mm

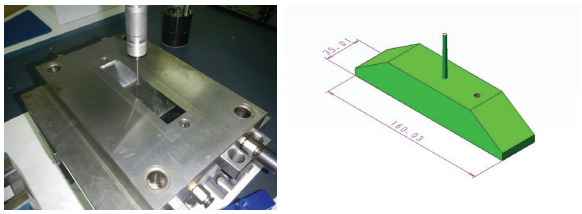

図 5　計測の様子と金型 CAD データ

5.4.3 寸法計測結果

成形品は樹脂製なので，接触式の測定器で計測すると，接触圧力によって測定物が変形し，計測誤差が生じる恐れがある．圧力負荷を掛けずに精密に計測するために，非接触デジタイジングシステム COMET5（Steinbichler 社製，平成 24 年度電源立地地域対策交付金）を用いることにした．比較計測を行った寸法位置を図 6 に，計測結果を表 9 に示す．また，表 9 の結果を成形品の実測値からの偏差としてグラフ化したものを図 7 に示す．

図 7 から分かるように，樹脂の流れ特性に関してパラメータチューニングした物性値データを用いて反り解析を行うことで，成形品の変形に関わる反り解析精度が向上している．

表 9　船底型成形品　寸法計測結果

測定位置	樹脂流動解析結果		成形品
	チューニング前	チューニング後	実測値
a: 縦	156.780[mm]	156.720[mm]	156.705[mm]
b: 横	34.270[mm]	34.320[mm]	34.310[mm]
c: 斜め	160.480[mm]	160.430[mm]	160.417[mm]
d: 高さ	29.230[mm]	29.200[mm]	29.176[mm]

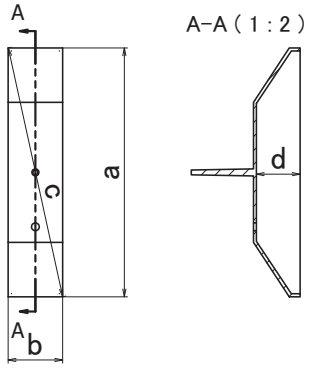

図 6　船底型成形品　寸法計測位置

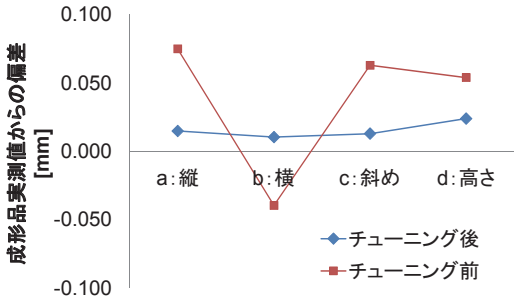

図 7　成形品実測値からの偏差

5.4.4 寸法変化の分布状態

部分的な寸法値の比較のみでは，パラメータチューニングによって反り解析の結果がどのように変化したのか大局的に把握することが難しい．そこで，パラメータチューニング前後の反り解析結果を比較し，その寸法値の差分を色分けして CAD データにマッピングした．寸法値の差分を可視化した画像を図 8 に示す．

赤や青は寸法値の変化が大きかった箇所を示しており，最大で ±30μm 程度値が変化している．緑の部分は寸法値の変化が少なかった箇所である．パラメータチューニングが反り解析に与える影響は，成形品全体に均等に及んでいるわけではなく，局所的に反映されていることが確認できる．

5.5 考察

射出成形機を用いた成形工程の初期段階において，溶融樹脂は金型に注入され，金型内部のキャビティ空間に樹脂が充填される．その際，溶融樹脂の内部に樹脂の流れに伴うせん断応力が発生する．一方，金属表面近傍において冷却による溶融樹脂の固化が進むため，せん断などにより溶融樹脂内部に生じた応力が，残留応力として固化層に形成される[6)]．その後，成形品が金型から取り出される際に残留応力が解放され，曲がりやねじれなどの成形不良として発現することになる．このように，成形品を変形させる残留応力の背景にあるものは，射出成形プロセスにおける樹脂の流動現象に起因するところが大きく，樹脂の流れに伴い発生する応力が，ひけや反りのメカニズムの根本的な要因の一つとなっている．

本研究においても，樹脂の流れ特性に関してパラメータチューニングした物性値を用いることで，スパイラルフロー試験のみならず，船底型成形品の反り解析精度が向上している．これは，パラメータチューニングによって，反り発生メカニズムの源流となる

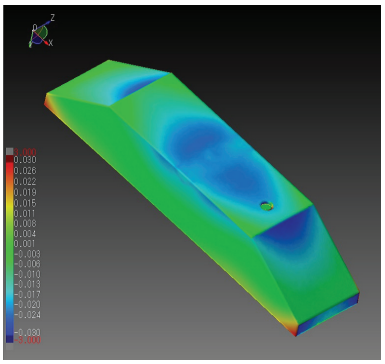

図 8　寸法変化の分布状態

流動現象の解析精度が改善され，樹脂流動に起因する残留応力の計算精度が向上したことを示唆するものである．特に，図 8 に示すように局所的に解析結果が変化した場所は，樹脂の流動状態がより現実の成形プロセスに近づいた結果，反り解析としての変形量予測精度が向上した位置を示していると考えられる．

6. おわりに

本年度は，樹脂の流れ特性に関する解析精度を検証するために，解析値と実測値の関係を直交多項式で近似し，展開した多項式の回帰係数を用いて定量的に評価する手法について検討した．さらに，フィッティングパラメータの変動に対する解析精度の応答を詳細に分析し，その傾向を数値化することで，高精度なパラメータチューニングを達成した．併せて，樹脂材料のモデル近似式を高精度化することで，樹脂の流動現象に関する解析のみならず，成形品の変形に関わる解析精度が向上することを確認した．

今回検討した一連の手法は，研究開発，構造設計，製造技術の高度化等さまざまな課題に適用できる汎用的な最適化手法であると考えられる．今後は，樹脂流動解析にとどまらず，あらゆる分野への応用展開について取り組んでいきたい．

参考文献

1) 吉野睦　他，シミュレーションとＳＱＣ，日本規格協会，2009，p.40-42.
2) 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（第２報），平成 23 年度佐賀県工業技術センター研究報告書，2011，No.20，p.21-27.
3) 田口玄一，機能設計（合わせ込み，チューニング）の方法，品質工学，2001，Vol.9，No.3，p.5-10.
4) 立林和夫，入門タグチメソッド，日科技連出版社，2004，p.106-110.
5) 金谷健一，これなら分かる最適化数学，共立出版株式会社，2005，p.114-116.
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.87-88.