

プラスチック射出成形金型の三次元冷却管最適配置設計法

松 森 唯 益*・山 崎 光 悦*・北 山 哲 士*

Optimal Layout Design for 3D Cooling Channels of Plastic Injection Molding Die

Matsumori, Tadayoshi*/Yamazaki, Koetsu*/Kitayama, Satoshi*

This paper discusses the differences between two-dimensional models and three-dimensional models of cooling channel layout designs in a plastic injection molding die. To identify the differences, two kinds of three-dimensional numerical models are designed by the design method of cooling channel layout proposed in our previous research.

The results show that, when the cooling channel layout is required so as to rapidly cool down and make temperature distribution of the plastic materials uniform, distinct cooling channel layouts are obtained because of different flow rates of coolant in the cooling channel between them. And also, it is shown that the distance between the cooling channel and cavity in the die is an effective factor to control the temperature distribution of plastic materials. From this result, the cooling channel layout design is implemented in two steps. At first, the distance between the cooling channel and the cavity is decided. The result of the first step is utilized as the initial design of the next step. In the second step, the length of cooling channel is designed. In addition, it is found that the surface area of cooling channel is important to control the temperature distribution of the plastic materials.

Key words : Optimum Design/Computer Aided Engineering/Multi-objective Optimization/
Plastic Injection Molding/Cooling Channel

1. 緒 言

プラスチック射出成形は、複雑な三次元自由形状の製品の成形が可能であることや、成形サイクルタイムが短く、生産性が高いことなどの特徴を持つプラスチックの成形加工法である¹⁾。プラスチック射出成形の加工過程の中で、特にプラスチックの冷却過程が製品の成形不良の原因となる残留応力の発生や、成形サイクルタイムに影響を与える。成形中のプラスチックの温度変化も含め、射出成形金型内の温度変化は主に冷却管配置により制御されることから、プラスチック射出成形金型の設計において、冷却管配置設計は重要な設計課題の一つとなっている²⁾。

一方、近年では、積層造形技術を用いた射出成形金型の製作が行われている³⁾。これにより、鋼材から削り出して製作される金型では困難であった、分岐や曲線形状を含んだ複雑な形状の冷却管配置の製作も可能になりつつあるため、金型内の場所に応じた、よりきめ細かな温度制御が可能になると考えられる。そのため、複雑な形状の冷却管を用いたプラスチック射出成形金型の冷却管配置設計に関する研究が行われ始めている^{4)~6)}。

著者らは、数値シミュレーションに基づくプラスチック射出成形金型の冷却管配置設計法を提案した⁷⁾。この方法の特徴の一つとして、冷却管配置設計問題を形状最適化問題として捉えていることが挙げられる。また、プラスチックに発生する残留応力を直接最小化するのではなく、プラスチックの冷却速度と温度分布を同時に最適化する多目的最適設計問題として冷却管配置設計問題を定式化した。この最適設計法では、冷却管配置の変更には形状最適化法の一つであるベシスベクトル法を、最適解を得るまでのシミュレーション回数を抑制するために実験計画法に基づいた応答曲面法をそれぞれ利用した。前報では、提案手法を

* 金沢大学大学院自然科学研究科
Graduate School of Natural Science & Technology, Kanazawa University
金沢市角間町 (〒920-1192)
Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa, 920-1192
2009. 3. 2 受理

二次元金型モデルの冷却管配置設計に適用し、その結果、冷却管内の冷媒流動を考慮すること、曲線形状を含む複雑な冷却管を利用することがプラスチックの温度制御に有効であることがわかった。

そこで本論文では、前報で提案した金型モデルの冷却管配置設計法を、三次元金型モデルの冷却管配置設計に拡張、適用し、その結果と前報で得られた二次元金型モデルの結果の類似性と相違について比較、検討する。また、二次元モデルでは設計できないより現実的な三次元モデルによって三次元設計の有用性についても検討する。前報では、多目的最適設計問題の解法に最も基本的な線形加重法を用いていたが、線形加重法では多目的最適設計問題の最適解であるパレート最適解をすべて求めることができない場合がある。そこで、本論文では、多目的最適設計問題のパレート最適解の求解に ε 制約法⁸⁾を用いる。

本論文の構成は、第2章において前報で提案した冷却管配置設計法の概略とその変更点を述べる。第3章では三次元金型モデルを対象に提案手法により冷却管配置設計を行い、二次元金型モデルと三次元金型モデルの冷却管配置の相違について検討する。最後に本論文の結言を述べる。

2. 冷却管配置設計法

2.1 冷却管配置設計法の概要

前報⁷⁾で提案したプラスチック射出成形金型の冷却管配置設計法の概要を以下に示す。

2.1.1 多目的最適設計問題の設定

プラスチックに発生する残留応力を直接的に抑制するのではなく、従来の研究^{9)~11)}を参考に、プラスチックの冷却速度と温度分布を評価する二つの関数 $f_{\text{ave}}(\mathbf{x})$ と $f_{\text{dev}}(\mathbf{x})$ を目的関数とした。また、設計変数に冷却管配置を表現するパラメータ \mathbf{x} を採用した。

$$\begin{aligned} f_{\text{ave}}(\mathbf{x}) &= \int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} [T_{\text{ave}}(\mathbf{x}) - T_c] dt \\ &= \int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} \frac{\sum_{i=1}^n [T_i(\mathbf{x}) - T_c]}{n} dt \rightarrow \min \end{aligned} \quad (1)$$

$$f_{\text{dev}}(\mathbf{x}) = \int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [T_i(\mathbf{x}) - T_{\text{ave}}(\mathbf{x})]^2}{n-1}} dt \rightarrow \min \quad (2)$$

上式において、 t は時刻、 t_{start} と t_{end} は冷却開始時刻と終了時刻を表す。また、 $T_i(\mathbf{x})$ と n は、有限要素モデルのキャビティ表面の節点温度と節点数を表し、 $T_{\text{ave}}(\mathbf{x})$ は各時刻におけるキャビティ表面節点の平均温度である。なお、 T_c は 273 (K) とした。

多目的最適設計問題は、式(1)、(2)で設定した目的関数を利用して、次式のように表される。

$$\text{Find} \quad \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T \quad (3)$$

$$\text{such as} \quad [f_{\text{ave}}(\mathbf{x}), f_{\text{dev}}(\mathbf{x})] \rightarrow \min \quad (4)$$

$$\text{subject to} \quad x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

ここで、 N は設計変数の数、 x_i^L と x_i^U はそれぞれ設計変数に直接課せられる側面制約条件の下限値と上限値である。

2.1.2 ベーシスベクトル法

曲線形状を含む複雑な形状の冷却管配置を設計するために、代表的な形状最適化法の一つであるベーシスベクトル法¹²⁾を用いる。そして、ベーシスベクトルの係数を設計変数として、以下の式により冷却管配置を変更する。

$$\mathbf{G} = \mathbf{G}_0 + \sum_{i=1}^N x_i (\mathbf{G}_0 - \mathbf{B}_i) \quad (6)$$

ここで \mathbf{G}_0 と \mathbf{G} は、冷却管配置の形状変更前後における解析モデルの形状を表すベクトルであり、以降 \mathbf{G}_0 は初期形状ベクトルと呼ぶ。また、 \mathbf{B}_i は冷却管配置の形状を決定する形状ベクトルであり、 x_i は冷却管配置の形状変更量を決定する設計変数である。

2.1.3 応答曲面法

数値シミュレーション回数を削減するために、実験計画法を利用した応答曲面法¹³⁾を採用した。応答曲面は、Chebyshev の直交多項式に基づいて、目的関数ごとに作成する。作成した応答曲面の近似精度は、自由度調整済み決定係数により評価した^{14), 15)}。

2.2 多目的最適設計問題の解法

式(3)~(5)で定義した多目的最適設計問題の最適解は、一般に唯一には定まらず、パレート最適解と呼ばれる解の集合として求められる⁸⁾。前報では、パレート最適解の求解に最も基本的な線形加重法を用いたが、その方法ではパレートフロントが非凸となる場合にパレート最適解を全て求めることができない可能性が残る。

そこで本論文では、パレート最適解を全て求めるために、 ε 制約法を用いた。 ε 制約法を用いた場合、式(3)~(5)に示した多目的最適設計問題は、例えば $f_{\text{ave}}(\mathbf{x})$ を制約条件として扱う場合、次のような制約条件付きの単一目的最適設計問題に変換される。

$$f_{\text{dev}}(\mathbf{x}) \rightarrow \min \quad (7)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

$$f_{\text{ave}}(\mathbf{x}) \leq \varepsilon \quad (9)$$

ここで ε は制約量を表す。

ε 制約法では、パレートフロントが非凸となる場合においても、式(9)に示した制約量 ε を適宜変更しながら最適化することで、変更した値域内のパレート最適解を全て求めることができる。

2.3 冷却管配置設計の流れ

本論文で提案する冷却管配置設計の流れを以下に示す。
(STEP 1) プラスチック射出成形金型の解析モデルを作成。この解析モデルを初期形状ベクトル \mathbf{G}_0 とする。
(STEP 2) 形状ベクトル \mathbf{B}_i ($i=1, 2, \dots, N$) の作成。
(STEP 3) 式(6)を用いて解析モデル \mathbf{G} を作成。ここで、設計変数 \mathbf{x} を直交表に割り付けて、冷却管の設計変更量を決定し、解析モデルを複数個作成する。
(STEP 4) 解析モデル \mathbf{G} の冷却解析。冷却解析では、冷却管内の冷媒流動を考慮するために、熱流体解析によりブ

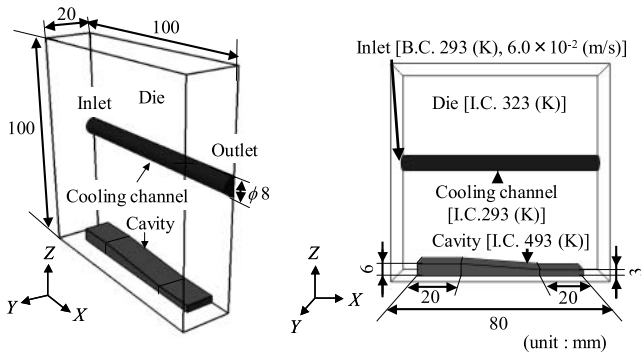


Fig. 1 Numerical model 1

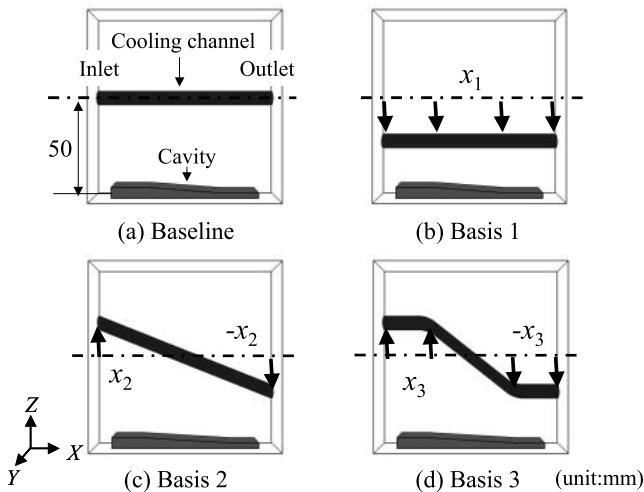


Fig. 2 Shape vectors

プラスチック射出成形金型内の温度を計算する。この熱流体解析には、汎用有限要素解析ソフトウェア FIDAP (Ansys Inc.) を用いた。

(STEP 5) 式 (1), (2) を用いた目的関数値の計算と応答曲面の作成。

(STEP 6) ε 制約法により定式化した式 (7)~(9) の最適設計問題の求解。本論文では、汎用最適化ソフト DOT (VR & D Inc.) の逐次二次計画法を用いて最適化を行った。

3. 冷却管配置設計例

3.1 キャビティに肉厚差がある金型モデルの冷却管配置設計

3.1.1 解析モデル

X - Y 平面に広がるプラスチックに対して、 Z 軸方向に移動する冷却管が、プラスチックの冷却速度と温度分布に与える影響を検討するために、図 1 に示すキャビティに肉厚差のある金型モデルを対象に冷却管配置設計を行った。

図 1 に示した解析モデルは、 X - Y 平面、 X - Z 平面に対して対称と考え、解析モデル全体の 4 分の 1 の領域を離散化して解析した。この解析モデルを 8 節点六面体要素により総節点数 145152、総要素数 158009 の有限要素に分割した。また、解析モデルでは、肉厚 40.0 (mm) の金型中央に、直径 8.0 (mm) の冷却管を配置した。

図 2 にベシスベクトル法で用いた初期形状ベクトルと形状ベクトルを示す。初期形状ベクトルの冷却管は X - Y

Table 1 Material properties

	Density (kg/m ³)	Specific heat (kJ/kgK)	Viscosity (kg/ms)	Heat conductivity (W/mK)
Cooling channel	9.98×10^2	4.00	1.00×10^{-3}	6.02×10^{-1}
Die	7.89×10^3	4.52×10^{-1}		73.0
Cavity	1.11×10^3	2.00		2.50

平面から Z 軸方向に 50.0 (mm) 離れた位置に配置した。前報の二次元の結果から、直線形状の冷却管だけでなく、キャビティに沿った曲線形状の冷却管も用いることが、金型温度の制御に有効であることが示唆されている。そこで、形状ベクトルとして、冷却管の入口と出口の位置を変更するような直線形状の冷却管を表現する二つの形状ベクトル (図 2(b): Basis 1, (c): Basis 2) に加え、キャビティに沿って冷却管を配置するような曲線形状の冷却管を表現する形状ベクトル (図 2(d): Basis 3) を用意した。

図 2 に示した初期形状ベクトルと三つの形状ベクトルとの差を式 (6) により計算し、三種類のベシスベクトルを作成した。ベシスベクトルの設計変数 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)^T$ の側面制約条件は、 Z 軸方向の移動量として次のように与えた。

$$-10.0 \text{ (mm)} \leq x_1, x_2, x_3 \leq 10.0 \text{ (mm)} \quad (10)$$

冷却解析では、冷却管内を流れる冷媒に水、プラスチック射出成形金型の材料に鋼、そしてキャビティにはプラスチックが既に充填されている状態を想定し、表 1 に示す材料定数を用いた。図 1 右に示すように、各領域には温度の初期条件として、それぞれ 293 (K)、323 (K)、493 (K) を与えた。境界条件は冷却管の入口に 293 (K) と流速 6.00×10^{-2} (m/s) を与え、冷却時間は 30.0 (s) とした。

3.1.2 応答曲面の作成

実験計画法に基づく応答曲面を作成するために、直交表 L_{27} (3^{13}) にベシスベクトルの設計変数を割り付けた。それに基づき作成した解析モデルの冷却解析を行い、目的関数値 $f_{ave}(\mathbf{x})$, $f_{dev}(\mathbf{x})$ を計算した。表 2 に直交表に割り付けた設計変数値と、そのときの目的関数値、および目的関数を近似した応答曲面値 $\tilde{f}_{ave}(\mathbf{x})$, $\tilde{f}_{dev}(\mathbf{x})$ を併せて示す。ここで、目的関数値は 27 個の目的関数値の中央値を用いて無次元化を行った。また、応答曲面は設計変数間の交互作用を考慮して作成した。

近似した二つの応答曲面の自由度調整済み決定係数はそれぞれ 0.998, 0.918 となったことから、応答曲面の適合性は良好であると判断できる。

3.1.3 解析結果と考察

図 3 に、応答曲面を用いて式 (7)~(9) で定式化した最適設計問題を解いて得られた制約量 ε とパレート最適解の関係を示す。また、表 3 に図 3 中の ε が 0.96 から 1.03 までの間の 5 つの制約量 (ε^a から ε^e) における典型的な冷却管配置を図示する。表 3 には冷却終了時刻 $t = 30.0$ s におけるキャビティ表面の温度コンター図と、そのときのキャビティ表面の最高温度と最低温度も同時に示す。表 3 の一点鎖線は、図 2(a) に示す初期形状の冷却管の中心線

Table 2 Orthogonal array $L_{27} (3^{13})$

Data No.	Design variables			Objective function		Response surface	
	x_1 (mm)	x_2 (mm)	x_3 (mm)	$f_{ave}(\mathbf{x})$	$f_{dev}(\mathbf{x})$	$\tilde{f}_{ave}(\mathbf{x})$	$\tilde{f}_{dev}(\mathbf{x})$
1	-10.0	-10.0	-10.0	1.017	1.516	1.017	1.822
2	-10.0	-10.0	0.0	1.024	0.612	1.024	0.633
3	-10.0	-10.0	10.0	1.023	0.614	1.024	0.320
4	-10.0	0.0	-10.0	1.023	0.832	1.023	0.817
5	-10.0	0.0	0.0	1.025	0.419	1.025	0.273
6	-10.0	0.0	10.0	1.019	1.240	1.019	1.203
7	-10.0	10.0	-10.0	1.025	0.368	1.024	-0.004
8	-10.0	10.0	0.0	1.021	0.983	1.022	1.116
9	-10.0	10.0	10.0	1.011	1.974	1.010	2.270
10	0.0	-10.0	-10.0	0.995	2.195	0.995	2.254
11	0.0	-10.0	0.0	1.002	0.867	1.001	0.826
12	0.0	-10.0	10.0	1.001	0.750	1.001	0.768
13	0.0	0.0	-10.0	1.000	1.150	1.001	1.250
14	0.0	0.0	0.0	1.002	0.468	1.002	0.467
15	0.0	0.0	10.0	0.996	1.652	0.996	1.652
16	0.0	10.0	-10.0	1.002	0.429	1.002	0.429
17	0.0	10.0	0.0	0.998	1.288	0.999	1.309
18	0.0	10.0	10.0	0.987	2.669	0.987	2.719
19	10.0	-10.0	-10.0	0.969	3.095	0.968	2.687
20	10.0	-10.0	0.0	0.969	1.000	0.972	1.019
21	10.0	-10.0	10.0	0.973	0.900	0.972	1.217
22	10.0	0.0	-10.0	0.974	1.685	0.974	1.682
23	10.0	0.0	0.0	0.975	0.515	0.974	0.660
24	10.0	0.0	10.0	0.968	2.148	0.968	2.100
25	10.0	10.0	-10.0	0.975	0.531	0.975	0.861
26	10.0	10.0	0.0	0.971	1.659	0.970	1.503
27	10.0	10.0	10.0	0.959	3.472	0.959	3.167

を示している。

図3および表3より、制約量 ϵ_i^a の冷却管配置では、キャビティに沿うような冷却管配置となった。そして、制約量 ϵ を緩和するほど冷却管がキャビティから離れる傾向が見られた。

前報で行った二次元金型モデルの冷却管配置設計では、プラスチックの冷却速度を速くすると、冷却管の入口がキャビティに近づき、一方で、プラスチックの温度分布を均一にすると、冷却管はキャビティに沿った曲線形状となった。この結果は、本節で示した冷却管配置の結果とは大きく異なっている。その要因として、冷却管内の冷媒流量が考えられる。二次元金型モデルでは、冷却管を単に冷却面として扱っており、三次元金型モデルよりも二次元金型モデルの方が冷却管内の冷媒流量を過大に見積もり、その結果、冷却管配置がプラスチックの温度に与える影響が相対的に大きくなり、冷却管配置の設計結果が異なると考えられる。

制約量 ϵ_i^a と制約量 ϵ_s^a のキャビティ表面の最低温度を比較すると、制約量 ϵ_i^a は制約量 ϵ_s^a よりも 25 (K) 低く、このことからプラスチックの冷却速度が速くなっていることがわかる。一方、制約量 ϵ_s^a の温度分布は制約量 ϵ_i^a よりも均一となっており、そのキャビティ表面の最高温度と最低温度の差も、制約量 ϵ_s^a では 3 (K)、制約量 ϵ_i^a では 26 (K)

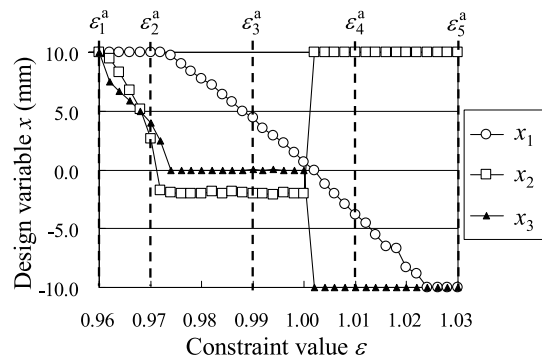


Fig. 3 Pareto optimal solutions

Table 3 Optimization results of cooling channel layout of model 1

ϵ	$\epsilon_i^a = 0.96$	$\epsilon_i^a = 0.97$	$\epsilon_i^a = 0.99$	$\epsilon_i^a = 1.01$	$\epsilon_s^a = 1.03$
Cooling channel layout					
Temperature distribution of cavity surface [t = 30.0 (s)]					
Max/Min temperature	398 (K) / 372 (K)	392 (K) / 388 (K)	394 (K) / 391 (K)	403 (K) / 400 (K)	410 (K) / 407 (K)

の差が見られ、プラスチックの冷却速度が遅くなると温度分布が均一になる傾向がある。したがって、プラスチックの冷却速度と温度分布の間にトレードオフの関係が存在し、冷却管をキャビティに沿って配置することでプラスチックの冷却速度を速くし、冷却管をキャビティから離すことでプラスチックの温度分布を均一にすることができると考えられる。

制約量 ε_4^a 付近から制約量 ε_5^a では、キャビティ表面の最高温度と最低温度はともに変化するが、それらの差は 3(K) ではほぼ一定値であった。また、表 3 と図 3 より、この区間の冷却管配置は、設計変数 x_1 のみが変化しており、冷却管の位置が $X-Y$ 平面に対して平行に移動していることがわかる。

以上のことから、本節で扱った冷却管配置設計例では、プラスチックの冷却速度を早くする場合、冷却管はキャビティに沿った曲線形状となり、温度分布を均一にしようとする場合、冷却管は直線に近い形状が得られた。また、冷却管とキャビティの距離 x_1 が、プラスチックの冷却速度と温度分布を評価する二つの目的関数の設計感度に大きな影響を与えることがわかった。

3.2 キャビティに矩形孔がある金型モデルの冷却管配置設計

3.2.1 解析モデル

本節では、キャビティに矩形孔がある図 4(a) に示すような金型モデルを用意し、 Z 軸方向だけでなく、 X 軸方向や Y 軸方向への冷却管の移動を考慮した冷却管配置設計を行う。

図 4(a) の金型モデルは、全体モデルの 4 分の 1 を示している。金型モデルの内部には、直径 8.0 (mm) の冷却管をキャビティ形状に沿うように配置し、その各コーナーには曲率 $R=10.0$ (mm) を与えた。このモデルを 8 節点六面体要素と 4 節点四面体要素を用いて要素数 372050、節点数 113353 の有限要素に分割した。

冷却解析の初期条件と境界条件は前節と同様に、温度の初期条件として、冷却管、金型、キャビティに 293(K)、323(K)、493(K) を与え、境界条件として、冷却管の入口に 293(K) と流速 6.00×10^{-2} (m/s) を与えた。材料定数は表 1 の値を用い、冷却時間は 30.0 (s) とした。

前節の結果から、冷却管とキャビティの距離がプラスチックの冷却速度と温度分布に大きな影響を与えることがわかった。その知見を基に、本節では初めに冷却管の寸法を固定し、冷却管とキャビティの距離、配置を決定した。次に、その結果得られた冷却管配置を初期設計として、 $X-Y$ 軸方向の冷却管の移動を考慮した二段階の冷却管配置設計を行った。

3.2.2 Z 軸方向への冷却管の移動を考慮した冷却管配置設計 (第一段階)

第一段階では、冷却管の寸法を固定し、冷却管とキャビティの距離を決定する。

(1) 初期形状とベシスベクトル 図 5 に初期形状とベシスベクトルを示す。

初期形状では、冷却管を $X-Y$ 平面から 30.0 (mm) 離れた位置に配置した。ベシスベクトルは、冷却管を $X-Y$ 平面に対して平行に移動させる Basis 1 と、冷却管の

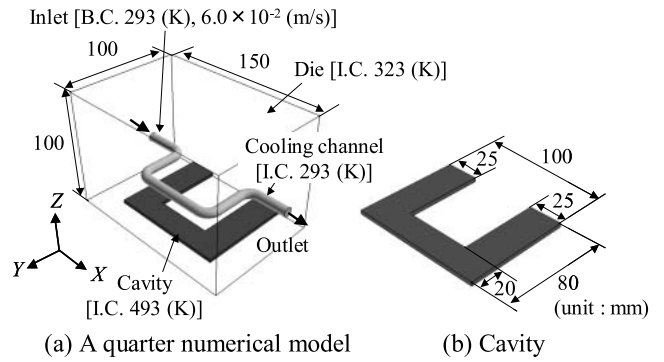


Fig. 4 Numerical model 2

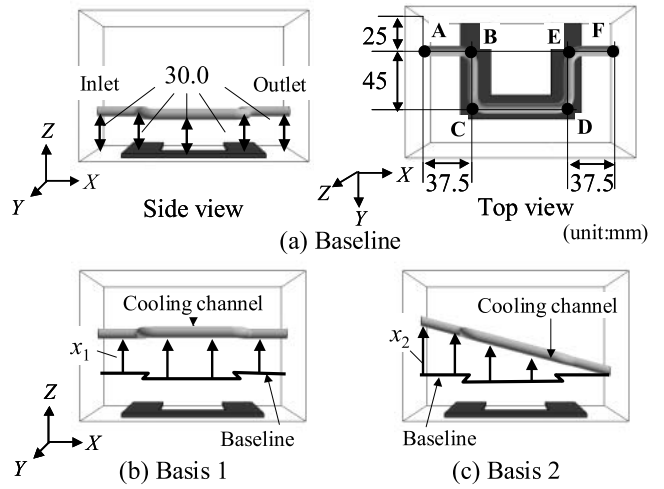


Fig. 5 Basis vectors to move a cooling channel in the Z direction

入口だけを Z 軸方向に移動させる Basis 2 を用意した。

設計変数の側面制約条件は、冷却管の Z 軸方向の移動量として以下のように設定した。

$$-10.0 \text{ (mm)} \leq x_1 \leq 10.0 \text{ (mm)} \quad (11)$$

$$0.0 \text{ (mm)} \leq x_2 \leq 20.0 \text{ (mm)} \quad (12)$$

(2) 解析結果と考察 設計変数の下限値、中間値、上限値を直交表 L_9 (3⁴) に割り付け、それに基づき作成した解析モデルの冷却解析を行い、目的関数値を求め、目的関数空間上にプロットしたものを図 6 に示す。

図 6 より、設計変数 x_2 の値を固定し、設計変数 x_1 を下限値 x_1^L 、中間値 x_1^M 、上限値 x_1^U に変化させたとき、各目的関数間にはトレードオフの関係があることがわかる。特に設計変数 x_2 の値を下限値 x_2^L に固定した場合に、パレートフロントが得られているものと考えられる。そこで、以降の冷却管配置設計においては、Basis 2 の設計変数 x_2 を下限値 ($x_2^L=0.0$) で固定し、Basis 1 の設計変数 x_1 を動かし、冷却管を $X-Y$ 平面に対して平行に移動させる設計モデルを対象とした。

3.2.3 $X-Y$ 軸方向への冷却管の移動を考慮した冷却管配置設計 (第二段階)

第二段階では、第一段階の結果を利用し、冷却管の寸法

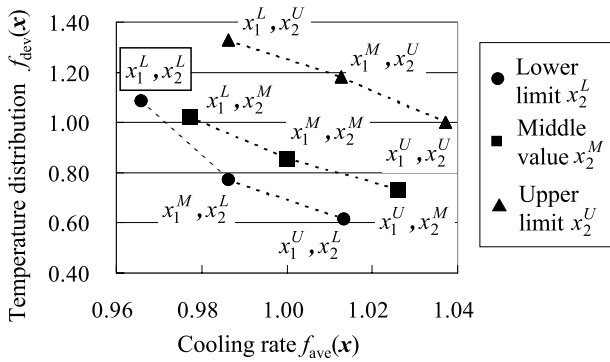


Fig. 6 Objective function values in objective space classified according to values of design variables.

($x_1^L = -10.0$, $x_1^M = 0.0$, $x_1^U = 10.0$, $x_2^L = 0.0$, $x_2^M = 10.0$, $x_2^U = 20.0$)

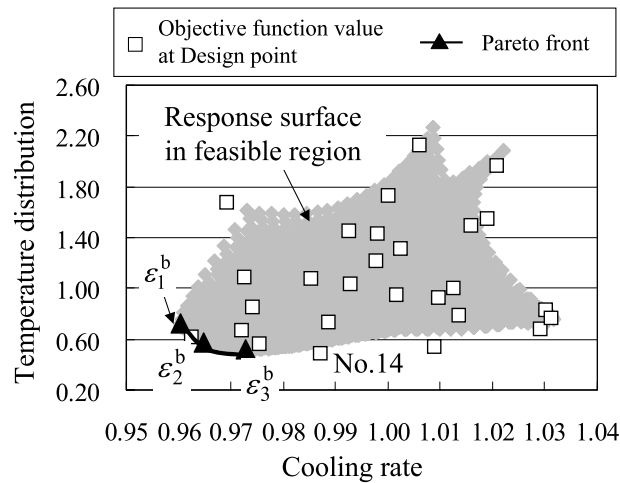


Fig. 8 Response surface in feasible region and objective function value at design points.

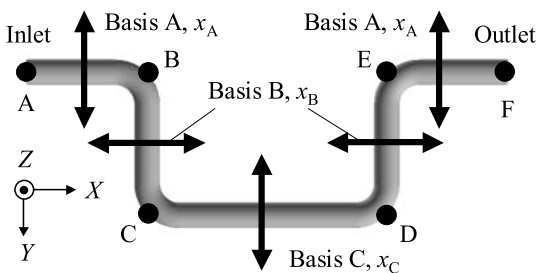


Fig. 7 Basis vectors to move a cooling channel in the X and Y direction.

を決定する。

(1) 初期形状とベシスベクトル 前項の結果のうち、図 6 中の実線枠で示した設計変数 $x_1^L = -10.0$, $x_2^L = 0.0$ のときの冷却管配置を初期設計として採用し、ベシスベクトルの初期形状として利用した。この金型モデルは、図 5(a) に示した金型モデルにおける冷却管と X-Y 平面との距離を、30.0 (mm) から 20.0 (mm) に変更したモデルとなる。

初期形状に対して、図 7 に示すような三つのベシスベクトルを用意した。同図は冷却管のみを示している。

Basis A は AB 間、EF 間の冷却管を Y 軸方向のみに移動させるベシスベクトル、Basis B は BC 間、DE 間の冷却管を X 軸方向のみに移動させるベシスベクトル、Basis C は CD 間の冷却管を Y 軸方向のみに移動させるベシスベクトルである。ベシスベクトルの設計変数の側面制約条件は、必要な設計変数範囲を網羅するように設定した。

$$-15.0 \text{ (mm)} \leq x_A, x_B, x_C \leq 15.0 \text{ (mm)} \quad (13)$$

(2) 応答曲面の作成 図 8 に作成した応答曲面の実行可能領域を示す。同図には、応答曲面の作成に用いた設計点の目的関数値 (□印)、および応答曲面のパレートフロント (実線) を併せて示す。

応答曲面は 3.1 節と同様に、設計変数間の交互作用を考慮し、直交表 L_{27} (3^{13}) を用いて作成した。作成した二つの目的関数に対する応答曲面の自由度調整済み決定係数

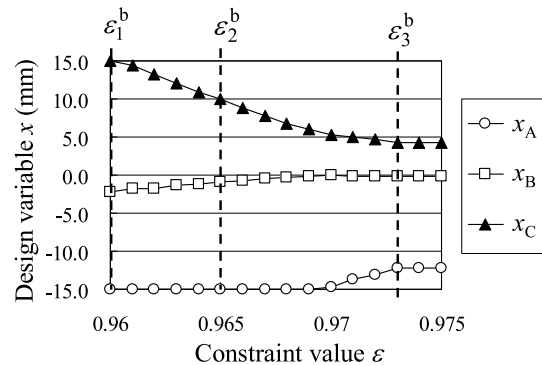


Fig. 9 Pareto optimal solutions.

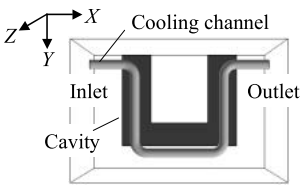
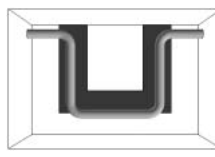
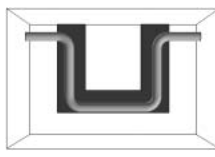
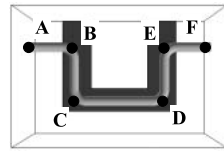
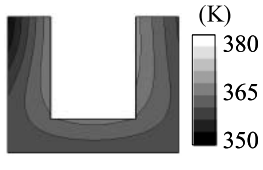

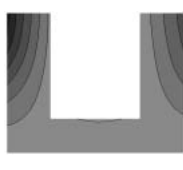
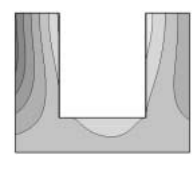
は、0.972, 0.922 であった。

(3) 解析結果と考察 図 9 に制約量 ϵ と応答曲面上のパレート最適解の関係を示す。また、表 4 に、図 8, 9 に示した制約量 ϵ_1^b から制約量 ϵ_3^b 、および初期設計 (設計点 No.14) の冷却管配置と、冷却終了時刻 $t = 30.0$ (s) のときのキャビティ表面の温度分布、最高温度、最低温度、および冷却管の面積比 (= 各冷却管配置の冷却管の表面積 / 初期設計の冷却管の表面積) を示す。

図 9 より、パレート最適解では Basis C の設計変数 x_C は大きく変化しているが、Basis A, Basis B の設計変数 x_A と x_B はほとんど変化しなかった。

表 4 より、制約量 ϵ_1^b は、初期設計の冷却管配置に比べて BC 間 (ED 間) の冷却管が長くなっており、CD 間の冷却管はキャビティから離れていることがわかる。また、制約量 ϵ_1^b の温度分布は制約量 ϵ_3^b よりも等高線の間隔が狭く、キャビティ表面に温度差がある。しかし、制約量 ϵ_1^b と制約量 ϵ_3^b のキャビティ表面の最高温度と最低温度を比較すると、その差は 1 (K) であり、最高温度と最低温度の差は 16 (K) で同じ値である。初期設計 (設計点 No.14) のキャビティ表面の温度分布は、パレート最適解のキャビティ表面の温度分布に比べて等高線の間隔は広いが、キャビティ表面の温度は全体的に 10 (K) 以上高い。冷却管の表面積は、制約量が初期形状に比べて約 25% も広い。このことは、冷却管の表面積が増加するほど、金型から多く

Table 4 Optimization results of cooling channel layout of model 2

ε	$\varepsilon_1^b = 0.960$	$\varepsilon_2^b = 0.965$	$\varepsilon_3^b = 0.970$	Initial design (No. 14)
Cooling channel layout				
Temperature distribution of cavity surface [t = 30.0 (s)]				
Max/Min temperature	367 (K) / 351 (K)	367 (K) / 351 (K)	368 (K) / 352 (K)	378 (K) / 364 (K)
Area ratio	1.27	1.22	1.14	1

の熱量を奪えることを示唆していると考えられる。

4. 結 言

本論文では、著者らが提案しているプラスチック射出成形金型の冷却管配置設計法を三次元金型モデルに適用し、二次元金型モデルとの相違を検討した結果、以下のような結論を得た。

- (1) 三次元金型モデルの冷却管配置設計を行った結果、冷却速度を速くする冷却管配置は、キャビティに沿った曲線形状となり、温度分布を均一にする冷却管配置は、直線に近い形状でキャビティから離れる傾向が見られた。一方、二次元金型モデルでは、冷却速度を速くする冷却管配置は、冷却管の入口がキャビティに近づき、温度分布を均一にする冷却管配置は、キャビティに沿った曲線形状が得られた。このように冷却管配置が異なった原因として、二次元金型モデルにおいて冷却管内の冷媒流動の影響を過大評価したことが考えられる。
- (2) 本論文で検討した三次元金型モデルでは、プラスチックの冷却速度と温度分布に対して、冷却管とキャビティの距離が大きな影響を与えることがわかった。この知見を基に、二段階に分けた冷却管配置設計を行った。具体的には、第一段階で、冷却管の寸法を固定し、冷却管とキャビティの距離を決定し、第二段階では、第一段階で得られた冷却管とキャビティの距離を固定し、冷却管の寸法を決定した。
- (3) 三次元金型モデルでは、冷却管の表面積が変化することで、冷却管が金型から奪う熱量も変化する。このことは、二次元金型モデルでは把握できない三次元金型モデル特有の現象であり、冷却管配置だけでなく、冷却管の表面積もプラスチックの温度分布に影響を与えることが明確となった。このことから、冷却管配置のより厳密な設計を行うには三次元金型モデルによる設

計が重要であることを確認した。

参 考 文 献

- 1) 横井秀俊：先端成形加工技術(プラスチック成形加工学会編)，39(1999)，シグマ出版
- 2) 天野修：プラスチック，50(8)，81(1999)
- 3) 榎原弘之：精密工学会誌，67(3)，403(2001)
- 4) 米山猛，香川博之，鈴木裕，阿部諭，宮丸充，中村芳信，五香征広，角南不二夫：型技術，19(13)，18(2004)
- 5) 是澤宏之，遠近祥史，鈴木裕：日本機械学会論文集 C 編，65(633)，2087(1999)
- 6) Xu, X., Sachs, E. and Allen, S.: *Polymer Engineering and Science*, 4(7), 1265(2001)
- 7) 松森唯益，山崎光悦：日本機械学会論文集 C 編，74(739)，731(2008)
- 8) 西川禎一，三宮信夫，茨木俊秀：最適化，135(1997)，岩波書店
- 9) Tang, L. Q., Chassapis, C. and Manoochchri, S.: *Finite Elements in Analysis and Design*, 26(3), 229(1997)
- 10) Lam, Y.C., Zhai, L.Y., Tai, K. and Fok, S.C.: *International Journal of Production Research*, 42(10), 2047(2004)
- 11) 高峰，是澤宏之，榎原弘之，鈴木裕：精密加工学会誌，68(6)，777(2002)
- 12) VR&D Inc.: *Genesis user's manual*, (2000), VR&D Inc.
- 13) 柏村孝義，白鳥正樹，于強：実験計画法による非線形問題の最適化，(1998)，朝倉書店。
- 14) 轟章：日本機械学会講習会(No.99-73) 資料「応答曲面法による非線形問題の最適設計入門」，11(1999)，日本機械学会
- 15) 菅民郎：多変量解析の実践(上)，26(1993)，現代数学社
- 16) 永田靖：入門実験計画法，369(2005)，日科技連