

(ライト設計システムの開発)

3 射出成形用金型の簡易冷却解析システムの開発

松永尚徳, 坂元康泰, 佐々木憲吾, 安部重毅

(Development of Light Design System)

Development of Simplified Cooling Analysis Program for Injection Mold

MATSUNAGA Hisanori, SAKAMOTO Yasuhiro, SASAKI Kengo, ABE Shigeki

In order to successfully design a part molded by injection molding, it is a common practice to use CAE programs today. However, CAE programs require material properties, molding conditions and mold structure. So it is convoluted mess to navigate for preliminary design of a cooling system. For this reason we developed a simplified analysis program only for preliminary design of a cooling system.

キーワード：射出成形，金型，冷却回路，基本設計，簡易解析

1 緒 言

本研究は，設計工程の効率化と高度化をライト（手軽）な感覚で実現する設計システムのご概念の提案と手法を開発するものである。H14年度は生産シミュレーションへ本研究の適用を行い，その一例として射出成形用金型冷却回路の基本設計を支援する簡易解析システムを開発した。

射出成形において金型は熱交換器ともいわれているように，冷却工程でいかに効率よく樹脂から熱を取り出すかが重要である。そのためには，冷却能力の高い金型でなければならない。射出成形用金型の設計においては，射出成形 CAE が支援ツールとして有効であり，次第に普及してきている。また，近年は3次元 CAD データを利用し手軽にかつ迅速に解析を行う市販ソフトも開発・普及されている。しかし，金型の冷却回路設計に解析を適用する場合は，手軽に解析ができるツールはなく，本格的な射出成形 CAE ソフトにより計算を行う必要があった。また，CAE を利用するためには，樹脂物性，成形条件，金型モデルが必要となるため，基本設計を行う段階では利用しにくい。そのため，金型設計者は手計算で金型の熱収支と冷媒循環の圧力損失の計算を行う必要がある。この計算が適正に行われていない場合，金型冷却能力が不足することもあり，それが生産性の低下や製品に生じるソリの原因の一つとなっている。

そこで本研究では，これらの課題を解決すべく，金

型冷却回路の基本設計を対象とした簡易解析システムを開発した。

2 簡易解析システム

2.1 概要

本システムの利用目的は射出成形用金型冷却回路の基本設計の支援とし，手軽かつ迅速に結果を求めることを最優先とした。そのためには，次のような特徴を持たせた。

一般的な市販 CAE ソフトで利用されている有限要素法や境界要素法は利用せず，近似式により代表値を概算する¹⁾。

樹脂物性には温度や圧力に対する依存性が存在するが，本システムではそれらの影響を無視し，大まかな物性値だけで計算できる。

図1のようにわかりやすい操作画面により手軽に操作でき，条件の変更も瞬時に結果に反映される。



図1 操作画面

使用できる単位系はSI 単位系の他、従来利用されていた CGS 単位系等も利用でき、単位換算の手間を省くことができる。

尚、本システムの開発言語は Microsoft 社の Visual Basic であり、広く普及している Windows PC であれば簡単に利用できる。フローチャートを図 2 に示す。

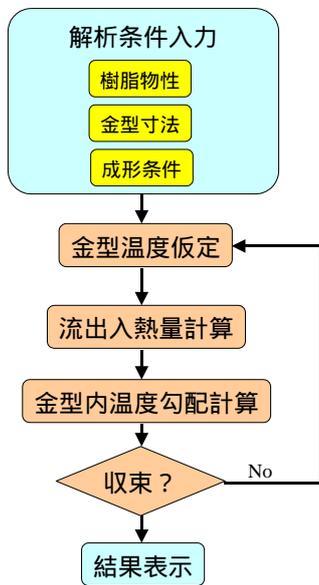


図 2 フローチャート

2.2 樹脂物性

プラスチックの特徴を示す物性値には様々なものが存在するが、本システムでは熱量の計算に必要な密度、比熱、熱伝導率を入力する。さらに結晶性樹脂の場合は結晶化潜熱、結晶化度、結晶化温度を入力する。本システムではよく利用される 12 種類の樹脂について物性値¹⁾²⁾の一例をデータベースとして保有しており、物性値が不明な場合でも概算が可能である。

2.3 金型寸法

本システムでは代表的な寸法値による近似計算を行うため、メッシュデータは不要である。図 3 に示す冷却管有効長さ L 及び径 D 、製品板厚の代表値 h 、樹脂と金型との伝熱面積 A を入力し、射出容量の入力や金型材質の選択を行う。

2.4 成形条件

成形条件として、射出樹脂温度、金型温度(仮定値)、サイクルタイム、冷却水温度及び流量を入力する。本システムでは離型樹脂温度(成形品を取り出し得る温度)を入力すれば、冷却に最低限必要な時間を概算するようにしており、その値を参考にサイクルタイムを決定できる。これにより、生産性を考慮した金型が設計できる。

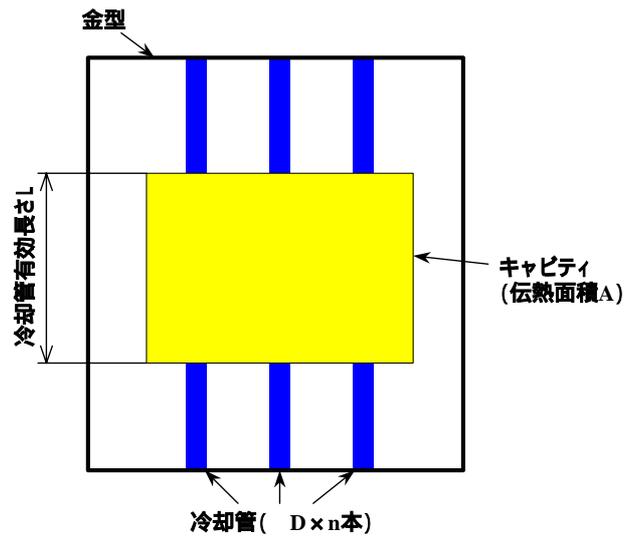


図 3 金型寸法の入力

2.5 流出入熱量計算

定常状態における金型への流出入熱量については式(1)が成り立つ。尚、本システムではダイブレードや射出ノズルを介して成形機との間に流れる熱量やホットランナ等の影響は考慮していない。

$$Q_{cool} = Q_{rin} - Q_{cin} \quad (1)$$

Q_{cool} : 冷媒による冷却熱量

Q_{rin} : 樹脂からの流入熱量

Q_{cin} : 周囲雰囲気への放熱熱量

2.5.1 樹脂からの流入熱量計算

樹脂からの流入熱量 Q_{rin} は、流入する樹脂量とその温度降下に伴い放出される熱量から計算できる。さらに結晶性樹脂の場合は結晶化する際に放出される結晶化潜熱の影響を考慮する必要がある。よって、式(2)により樹脂からの流入熱量 Q_{rin} を計算できる。

$$Q_{rin} = n \cdot w [C_p (T_{rin} - T_{rout}) + \Delta H_u \cdot X_c] \quad (2)$$

n : 単位時間当たりのショット数

w : 1 ショット当たりの樹脂重量

C_p : 樹脂の平均比熱

T_{rin} : 樹脂射出温度

T_{rout} : 離型時樹脂平均温度

ΔH_u : 樹脂の結晶化潜熱

X_c : 成形品における樹脂の結晶化度

離型時樹脂平均温度 T_{rout} は式(3)で計算でき³⁾、流入熱量 Q_{rin} は金型温度 T_{cavi} の関数となる。

$$Trout = Tcavi + \frac{8}{\pi^2} \cdot e^{-\frac{\pi^2 \cdot t \cdot k}{h^2 \cdot Cp \cdot \rho}} \cdot (Trin - Tcavi) \quad (3)$$

$Tcavi$: 金型温度

t : 成形サイクル

k : 樹脂の熱伝導率

ρ : 樹脂の密度

h : 成形品板厚

2.5.2 周囲雰囲気からの流入熱量計算

周囲雰囲気からの熱の出入りは、金型表面と空気との熱伝達⁴⁾と輻射⁵⁾によるものであり、式(4)により表される。なお、本システムでは金型表面温度 Tm は冷媒の入口温度 $Twin$ と金型温度 $Tcavi$ の平均値と仮定して求めている。

$$Qcin = Am \cdot hnc \cdot (Tm - Tc) + \sigma \cdot \varepsilon \cdot Am (Tm^4 - Tc^4) \quad (4)$$

Am : 金型放熱面積

Tm : 金型表面温度

Tc : 周囲環境温度

hnc : 自然対流熱伝達率

σ : ステファン・ボルツマンの定数

ε : 金型の放射率

2.6 温度勾配の計算

本システムでは、**図4**のように温度勾配を簡略化して計算する。冷媒温度は金型入口から出口にかけて上昇するが、ここでは冷却能力不足を回避するため式(5)で示される出口温度 $Twout$ を基準とする。

$$Twout = Twin + \frac{Qcool}{Cpw \cdot Vw} \quad (5)$$

$Twin$: 冷媒の金型入口温度

$Twout$: 冷媒の金型出口温度

Cpw : 冷媒の平均比熱

Vw : 冷媒の単位時間当たり質量流量

冷媒と金型の間での熱移動は熱伝達により、その熱抵抗は伝熱面積 Ac と熱伝達率 hw により決まり、熱抵抗により温度差 Twm が生じる。

冷却管間表面からキャビティ部金型表面にかけては伝導熱と考えられ、伝熱面積 Aav と冷却管深さ X 、及び金型の熱伝導率 km により温度差 Tm が決まる。なお、ここで伝熱面積 Aav は粗い近似として、**図3**で示されるキャビティ表面積 A と冷却管表面積 ($n \cdot DL$) の平均値とした。

キャビティ部金型表面と樹脂の間の熱移動も熱伝達

により、その熱抵抗は伝熱面積とその熱伝達率で決まる。しかし、樹脂と金型間の熱伝達率は未だ明らかになっておらず、本システムでは考慮しない。

よって、式(6)により金型温度 $Tcavi$ を求めることができる。式(1)～(4)で利用した $Tcavi$ の値と式(6)の値が異なる場合は $Tcavi$ の値を修正し、収束するまで反復計算を行う。

$$Tcavi = Twout + \Delta Twm + \Delta Tm = Twout - \frac{Qcool}{Ac \cdot hw} - \frac{Qcool \cdot X}{Aav \cdot km} \quad (6)$$

Ac : 冷却管表面積 (**図4** 参照)

$$Ac = n \cdot \pi \cdot D \cdot L$$

hw : 冷媒 - 金型間の熱伝達率

X : 熱伝導距離 (**図4** 参照)

Aav : 熱移動面積

km : 金型の熱伝導率

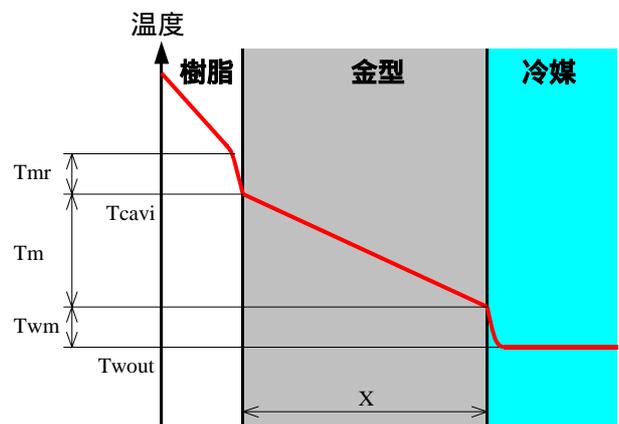


図4 温度勾配モデル

3 適用事例

3.1 妥当性の検証

図5に示す簡易なモデルについて、市販の射出成形CAEソフト PLANETS を用いた金型冷却解析の結果(**図6**)と、本システムによる計算結果を比較し、本システムの妥当性を評価した。その結果を**表1**に示す。本システムでは温度分布を求めることはできないものの、PLANETS と比較して妥当性のある答えを得ることができる。また、**図1**に示される項目を入力するだけであるため、2分程度で結果を求めることができ、基本設計に有効であることが確認できた。

3.2 シロッコファン用金型への適用

次にシロッコファン用射出成形金型⁶⁾について、適用結果を示す。本金型では成形品形状は円筒形であり、冷却管の配置状況から、**図3**のように冷却管有効長さ

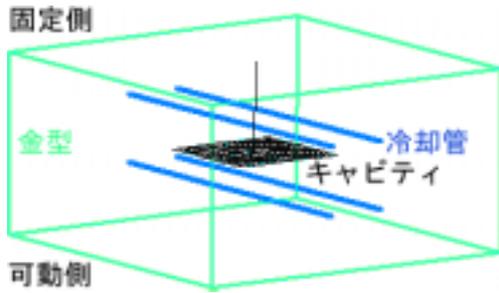


図5 検証用モデル

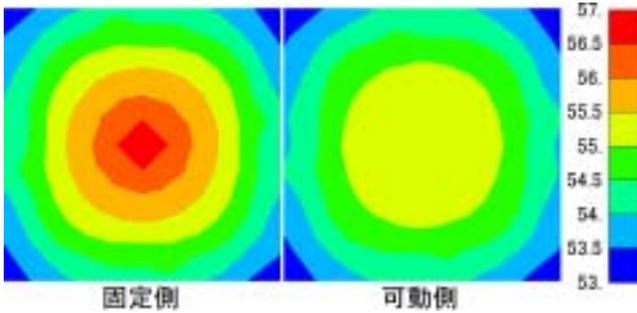


図6 PLANETSによるキャビティ表面温度分布
(サイクルタイム60秒の例)

である。複雑形状や複雑な金型構造へ適用させる場合は、あらかじめ類似した事例で計算結果の傾向を把握しておく必要がある。

表2 シロッコファン用金型温度実測値との比較

	温度()	
	固定側	可動側
計算値	27.23	42.13
実測値	29~43	42~51

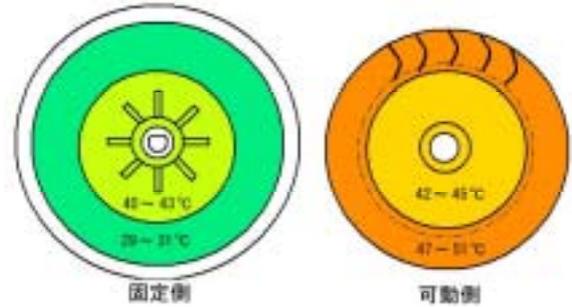


図7 シロッコファン用金型温度分布⁶⁾

表1 市販CAEソフトPLANETSとの比較

サイクルタイム	キャビティ表面温度()	
	PLANETS	本システム
30秒	固定側：57.4~64.5 可動側：57.3~61.8	59.8
60秒	固定側：53.0~57.0 可動側：53.0~55.4	54.3

を $n \text{本} \times D \times L$ と与えることはできない。また、冷却管深さも場所により異なる。従って、冷却管有効長さの総和を合わせ、冷却管深さは平均値とするといった工夫が必要である。この事例に関するキャビティ表面温度の計算値と測定値を表2に示す。ただし、測定値は成形品取り出し時に接触式温度計でキャビティ表面を測定し、図7に示すように大まかに温度分布を求めたものである。

この事例では計算値が低くでており、これは伝熱面積として成形品表面積を入力したためである。実際には冷却の程度は成形品部位により異なり、あまり冷却に関与しない部位は除いて伝熱面積を入力すべきではある。しかし、成形品形状や金型構造が複雑な場合には正確な予測は困難となるため、精度良い計算は無理

4 結 言

射出成形用金型冷却回路設計に特化した簡易解析システムを開発し、次のことを確認した。

- (1) 簡略な操作により、妥当な計算結果を迅速に得ることができ、冷却回路の基本設計においての有用性を確認した。
- (2) 複雑な成形品形状や金型構造を対象とする場合は、計算条件の入力値によっては大きな誤差が生じるため、あらかじめ類似した事例で計算結果の傾向を把握しておく必要がある。

文 献

- 1) 天野修:高度ポリテクセンター セミナー資料「金型温度制御と冷却回路の設計」(2002)
- 2) 化学工業日報社:プラスチック成形材料商取引便覧(2001年版)
- 3) 天野修:プラスチック,52(2001)9,104
- 4) 日本機械学会:伝熱工学資料(改訂第4版),68
- 5) 日本機械学会:伝熱工学資料(改訂第4版),156
- 6) 松永他:広島県立西部工業技術センター研究報告, No44(2001),7