

# プラスチック射出成形の金型温度についての研究 (第1報)

阿部 治・寺澤章裕・山田博之・西村通喜

## Study on Die Temperature of Plastic Injection Molding (1st Report)

Osamu ABE, Akihiro TERASAWA, Hiroyuki YAMADA and Michiyoshi NISHIMURA

### 要 約

重要な成形条件である金型温度については不明な点が多い。そこで、金型温度の実測を行う方法について検討し、射出成形時の金型のパーティング面の温度分布を測定した。その結果、温度分布が一様ではなく、温度変化が安定するまでに数回の成形が必要であることがわかった。また射出成形シミュレーションソフトウェアによる非定常金型冷却解析において、実測した温度条件を入力することにより解析精度が向上し、パーティング面の温度分布の傾向や、温度が安定するまでの成形回数がある程度予測することができた。

### 1. 緒 言

プラスチック射出成形を行うためには、材料の計量・充填、樹脂温度、金型温度、金型の型締、冷却、成形品のイジェクトなどに関する様々な成形条件を設定する必要がある。成形条件は成形品の品質に影響を与える。金型温度に関しては、適正温度以上であれば樹脂の流動性が向上し成形性が良くなるが、温度が高くなり過ぎるとバリの発生やサイクルタイムの増加などの問題が発生する。一方、金型温度が適正温度より低い場合には、樹脂の流動性が悪化し、未充填や外観不良などの問題が発生する。また、金型内で温度分布の差が大きく生じると、反りやねじれなどの要因となることも多い。そのため金型温度は重要な成形条件の一つである。

射出成形機は、電動化やデジタル処理により、安定した成形が行えるようになってきている。しかし、成形条件の重要な要素のひとつである金型温度の管理に関しては、金型温調機を用いて金型内部の冷却回路に温度調整した冷媒を流す従来からの方法が主流である<sup>1)</sup>。冷媒の温度管理は行われているが、金型自体の温度管理は、金型に数ヶ所取り付けられている温度計による測定や、非接触温度計による表面温度の定期的な測定により、局所的に行っている場合が多く、金型の温度分布については不明な場合が多い。また金型ごとに効果的な冷却配管をカスタマイズする必要があるため、統一的な指標がなく、技術的課題が多く残されている。そのため、冷却回路の設計や金型温度に関する条件設定にはオペレーターの経験やノウハウに依存している要素が多く、過去の経験的裏付けに基づいて条件を決めているという現状がある<sup>2)</sup>。

また金型の冷却回路設計にはコンピュータによる数値解析

(CAE) が活用され始めており、射出成形シミュレーションソフトウェアにおいても、金型冷却解析が可能である。しかし、実際の金型温度分布については不明な部分が多く、CAE では実現象のすべてを考慮することはできない。そのため金型冷却解析を活用するには、シミュレーションと実測との誤差およびその要因を把握し、解析精度を向上させることが必要となる。

そこで、本研究では金型温度分布を実測により明らかにし、金型冷却解析結果と比較することで、解析精度の向上をはかる。その後、CAE を活用した効率の良い冷却回路の設計の提案を行う計画である。また、金型の温度管理や冷却回路設計に活用できる指標を得ることを目指す。

本報では、はじめに金属表面の温度分布を測定する方法について検討し、実際の射出成形用金型のパーティング面の温度分布を測定した結果を報告する。また射出成形シミュレーションソフトウェアによる金型冷却解析を行い、射出成形用金型のパーティング面の温度分布の予測結果と、実際の測定結果について比較検討したので報告する。

### 2. 金属表面の温度分布の測定

#### 2-1 実験方法

一般的に温度の二次元的な分布を測定するには、赤外線サーモグラフィが使用されている。しかし、金属表面は赤外線の輻射率が小さいため<sup>3)</sup>、周囲の物質が放射した赤外線が金属表面で反射してしまうことや、金属表面から赤外線が放射されにくいといった問題がある。そのため赤外線サーモグラフィでは、金属表面の温度分布を正しく測定することが難しい。そこで、金属表面に処理を施し輻射率を大きくすることで、赤外線サーモグラフィにより金属表面の温度分布が正しく測定できるか検証した。

図 1 に示すように、NAK80 ブロック材 (125mm×60mm×30mm) の半分は黒体スプレー (タスコジャパン (株)製 THI-1B) を塗布することにより、表面の輻射率を 0.94 とした。NAK80 ブロック材をホットプレート上で加熱したときの表面の温度分布を赤外線サーモグラフィ (NEC 三栄(株)製 THR-3100mr) により測定した。赤外線サーモグラフィの輻射率設定は 0.94 とした。同時に NAK80 ブロック材の表面に K 型熱電対を貼付し、データロガー (グラフテック(株)製 GL500) で温度を測定した。

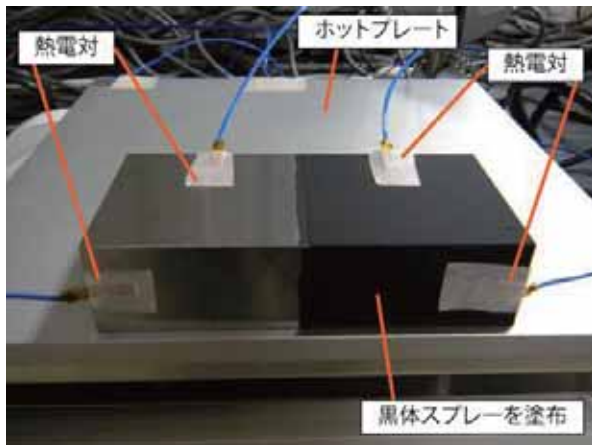


図 1 NAK80 ブロック材 (半分は黒体スプレーを塗布)

## 2-2 結果および考察

赤外線サーモグラフィで測定した NAK80 ブロック材表面の温度分布と熱電対による測定値を、図 2 および図 3 に示す。金型温調を 20℃および 40℃に設定した場合を想定し、NAK80 ブロック材表面が約 20℃および約 40℃の場合の結果を示している。

黒体スプレーを塗布していない面は輻射率が小さく赤外線が放射されにくいため、赤外線サーモグラフィで測定した温度分布の値は熱電対による測定値よりも著しく低くなっている部分があり、正しく測定できないことがわかった。また赤外線サーモグラフィの輻射率設定を 0.94 より小さくしても、熱電対による測定値と同等の温度分布は得られなかった。一方、黒体スプレーを塗布した面では、熱電対による測定値とほぼ同等の温度を示している。

黒体スプレーを塗布して金属表面の輻射率を大きくすることで、赤外線サーモグラフィにより、金属表面の温度分布を熱電対による測定と同程度の精度で測定できることを確認した。この方法により、金型表面の温度分布を測定することが可能となった。

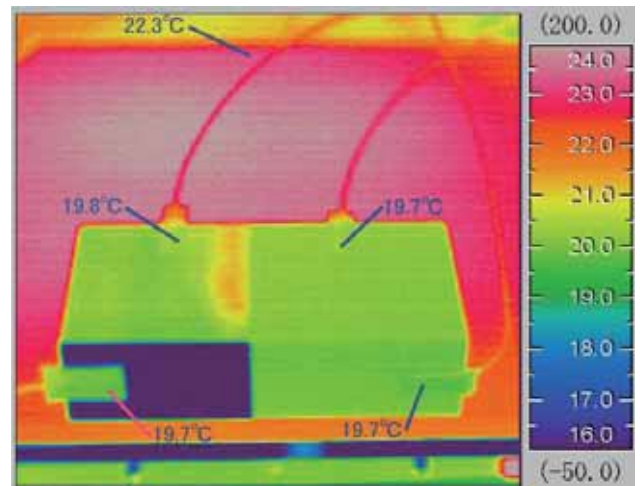


図 2 サーモグラフィで測定した温度分布と熱電対による測定値 (20℃付近の結果)

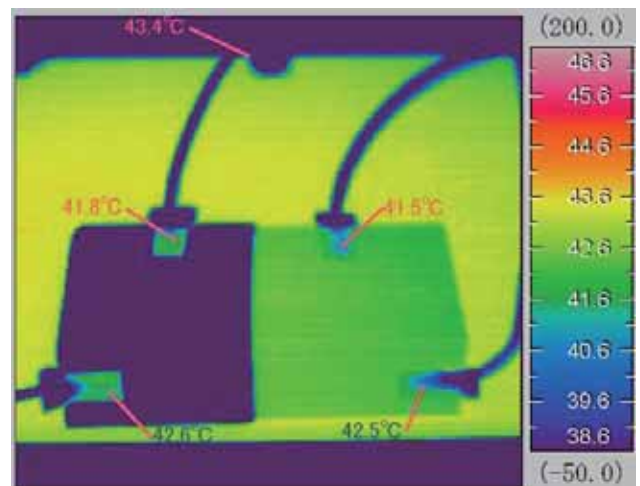


図 3 サーモグラフィで測定した温度分布と熱電対による測定値 (40℃付近の結果)

## 3. 金型温調機による金型温度管理

### 3-1 実験方法

射出成形機に取り付けられた金型は、金型温調機による温度管理が行われている。そのため射出成形時の金型表面の温度分布を測定する前に、その初期状態である金型温調を行った場合の金型表面の温度分布を測定する必要がある。そこで、金型表面について、金型温調開始時からの温度の経時変化を測定した。

射出成形機 (ファナック(株)製 α-30C) に、図 4 に示すカセット式の金型 (カセット型) を取り付けた。カセット型はベースに脱着可能なカセットを設置する構造となっており、実験で使用したカセットはパーティング面の大きさが 150mm×150mm、長さが可動側、固定側ともに 50mm である。このカセットは図 5 に示すように入れ子構造を有している。また金型の可動側および固定側のそれぞれに、2 本ずつストレートな冷却管が貫通しており、金型温調機

((株)カワタ製 DR-15Z-TW) から温度を一定に保った水が 20l/min で供給されている。冷却管内の水は図 5 に示す矢印方向に流れている。図 5 に示すように、この金型の可動側のパーティング面および成形品部に黒体スプレー (タスコジャパン(株)製 THI-1B) を塗布した。

このカセット型について、金型温調を 20℃および 40℃ に設定した場合の温調開始時からの温度の経時変化を測定した。カセットのパーティング面の温度分布については、赤外線サーモグラフィ (NEC 三栄(株)製 THR-3100mr) で測定した。またパーティング面以外の外表面については、K 型熱電対を貼付しデータロガー (グラフテック(株)製 GL500) で温度の経時変化を測定した。赤外線サーモグラフィは図 6 に示すように射出成形機の金型開閉部の下に設置し、図 7 に示す範囲についての温度分布を測定した。また K 型熱電対は図 8 に示す位置に貼付した。

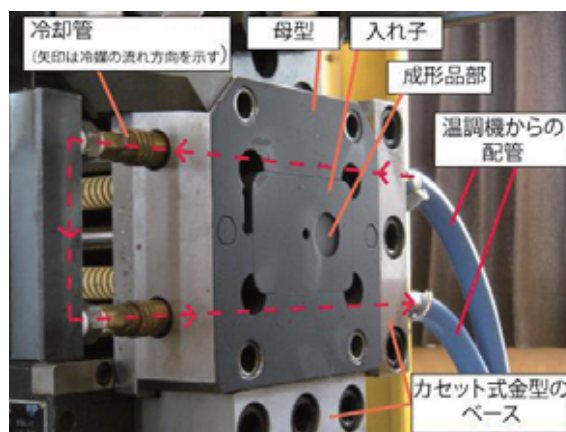


図 5 黒体スプレーを塗布した金型 (可動側)



図 4(a) 使用したカセット型のカセット



図 6 赤外線サーモグラフィの設置位置



図 7 赤外線サーモグラフィの測定範囲

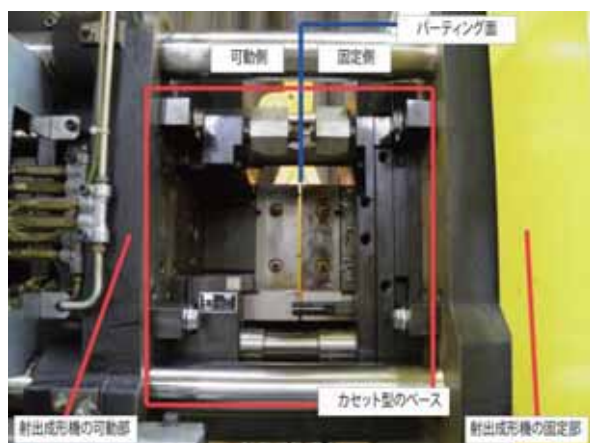


図 4(b) 射出成形機に取り付けたカセット型のベース

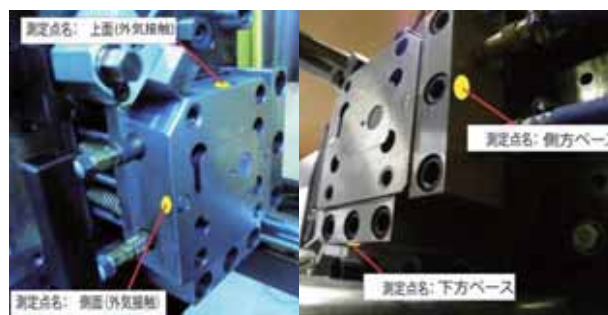


図 8 外表面の温度測定位置



### 3-2 結果および考察

熱電対による温調開始からの温度の経時変化の測定結果について、金型温調を 20℃および 40℃に設定した場合を図 9 および図 10 にそれぞれ示す。また金型温調開始後 60 分が経過したときのパーティング面の温度分布について、金型温調を 20℃および 40℃に設定した場合の赤外線サーモグラフィによる測定結果を図 11 および図 12 にそれぞれ示す。

温調開始後 30 分が経過すると温度上昇は小さくなり、60 分経過後には平衡状態となった。金型温調機の水温は一定に制御されているが、金型の温度分布は一樣ではなく、上部の温度が高く、下部の温度が低くなっていた。上部の温度が高い原因は、温調された冷却水が側方ベースから上部の冷却管に流入しているためと考えられる。さらに、ベースとカセットの接触面は熱伝導により放熱するため、熱伝達により放熱する外気接触面よりも放熱しやすいと考えられる。ただし、ベースとカセットの接触面については、微視的にみると金属が点接触している部分が多数あり、接

触部以外は空気で満たされている状態である。そのため下方ベースとカセットの接触面は、カセットの自重により点接触する部分が多くなり、側方ベースとカセットの接触面よりも放熱しやすいと考えられる。また側方ベースは内部に温調された冷却水が流れており、下方ベースよりも高温になる。そのため側方ベースよりも下方ベースに接した面の方が低温になると考えられる。これらの理由により、金型の上部の温度が高くなっていると考えられる。

このように金型の表面では放熱状態の違いがあり、金型温調を行った場合でも、温度分布が一樣とならないことがわかった。金型冷却解析などの CAE を行う場合、金型表面の放熱状態を設定する必要があるため、実測により確認しておくことが重要である。また今回使用したカセット型では、温度分布が平衡状態になるまでに 60 分程度かかっている。射出成形を開始する前に、十分な時間をかけて金型温調を行う必要があることがわかった。

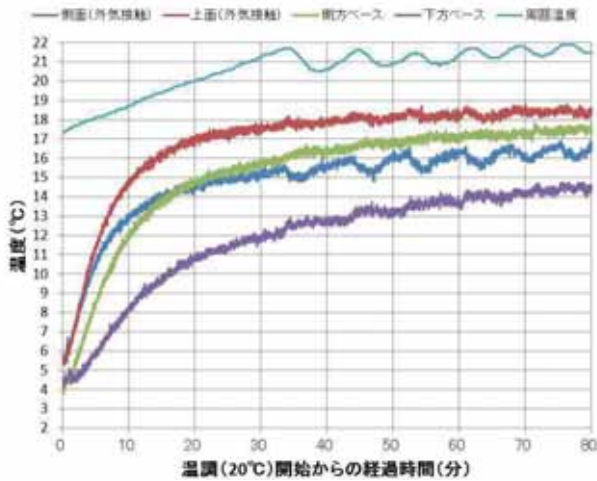


図 9 金型表面温度の経時変化（金型温調 20℃の場合）

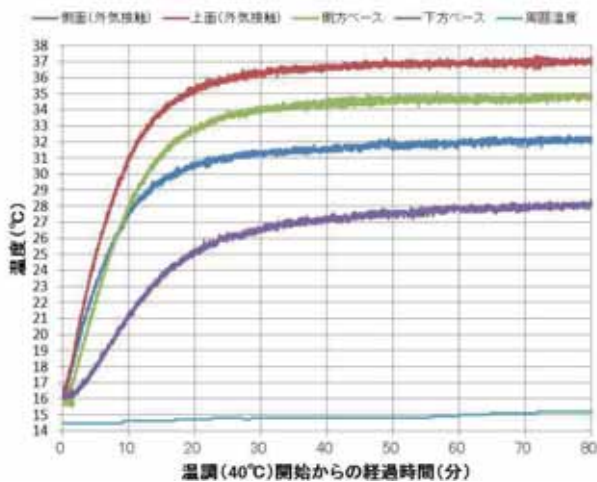


図 10 金型表面温度の経時変化（金型温調 40℃の場合）

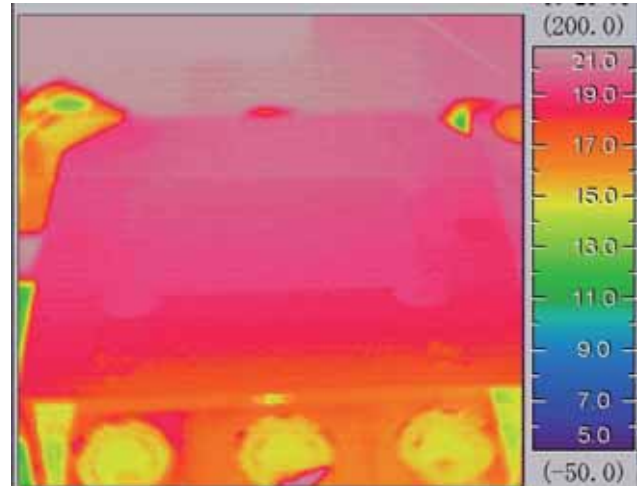


図 11 金型温調開始後 60 分経過したときのパーティング面の温度分布（金型温調 20℃の場合）

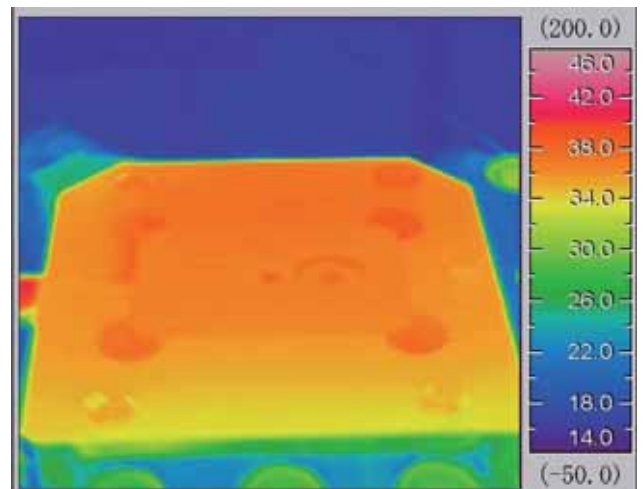


図 12 金型温調開始後 60 分経過したときのパーティング面の温度分布（金型温調 40℃の場合）

## 4. 金型のパーティング面の温度分布測定

### 4-1 実験方法

実際に射出成形を行った場合、金型のパーティング面の温度分布がどのように変化するかを確認するために、測定を行った。射出成形を開始する前に、3-1 節で述べた方法で金型温調を行い赤外線サーモグラフィを設置した。金型の表面温度が安定するように温調開始後 2 時間が経過したのちに、低密度ポリエチレン（日本ポリオレフィン(株)製 J-REX LD JM901N）を用いて表 1 に示す成形条件により射出成形を行った。成形品の形状は図 13 に示すとおりである。成形の充填・保圧・冷却が完了し金型が開いた直後に、パーティング面の可動側および成形品の温度分布を赤外線サーモグラフィにより測定した。なおイジェクト機能は使用していないため、成形品を手動で取り出した後、次の成形を開始した。そのため各成形のサイクルタイムはおおむね 60 秒程度であった。

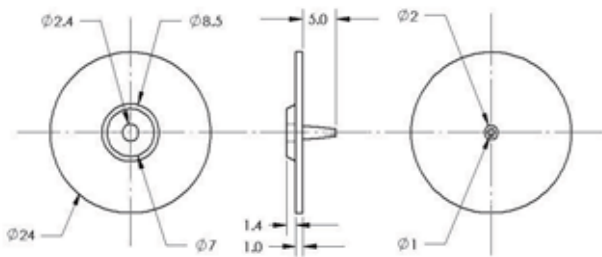


図 13 成形品の形状

表 1 主な成形条件

射出速度	25 mm/sec
射出圧力	500 kg/cm <sup>2</sup> (49MPa)
保圧	250 kg/cm <sup>2</sup> (29.5MPa)
冷却時間	10秒
成形温度 (ノズルヒータ部温度)	200℃
金型温調の設定温度	20℃または40℃
サイクルタイム	約60秒

### 4-2 結果および考察

金型温調を 20℃および 40℃に設定し、成形回数ごとのパーティング面（可動側）および成形品の温度分布を赤外線サーモグラフィにより測定した結果を、図 14 および図 15 にそれぞれ示す。

いずれの場合においてもパーティング面の下部の温度が低くなる傾向があることがわかった。これは 3-2 節で述べたように、下方ベースに接触している部分からもっとも多く放熱するためだと考えられる。また入れ子と母型の境

界面に温度差が生じている。境界面は一様に接触しているわけではなく、微視的にみると金属が点接触している部分が多数あり、接触部以外は空気で満たされている状態である。そのため、境界面は熱抵抗を持つ面とみなすことができ、温度分布が不連続になると考えられる。

また本研究における実験条件では、金型温調を 20℃に設定した場合には、成形回数が 10 回目までは温度分布の変化が大きく、10 回目以降は安定していた。金型温調を 40℃に設定した場合には、成形回数が 20 回目までは温度分布の変化が大きく、20 回目以降は安定していた。

金型表面の温度分布の変化により、成形品の状態も変化する可能性があるため、温度が安定するまでの間の成形については、成形品の寸法や品質を管理することが望ましいと考えられる。なお温度分布が安定するまでの回数は金型構成や実験条件により異なるため、実測が難しい場合には金型冷却解析などの CAE を活用することが有用である。

## 5. 射出成形シミュレーション

### 5-1 実験方法

3 章および 4 章で使用した金型について、CAE を用いて実現象を精度よく予測できるか検証するために、射出成形シミュレーションソフトウェア（東レエンジニアリング(株)製 3D TIMON 9.3）を使用して、非正常金型冷却解析を行った。

図 16 に示すように、キャビティ、ゲート、ランナー、スプルー、冷却管およびカセットをモデル化し、金型温調を 20℃に設定した場合と 40℃に設定した場合を想定して、非正常金型冷却解析を行った。非正常金型冷却解析では、各サイクルごとに充填・保圧冷却解析を行い、その解析結果を逐次反映することにより、設定したサイクル数の過渡解析を行っている。本解析ではサイクル数を 40 とした。解析条件は表 2 のとおりである。なお 3D TIMON では、成形機などの固体と接触する面について、熱伝達係数と外部温度を与える方式を取っている。固体接触面の熱伝達係数については、3D TIMON の推奨値である 80W/m<sup>2</sup>/K を設定した<sup>4)</sup>。非正常金型冷却解析の温度に関する条件については 3-2 節および 4-2 節で述べた実測結果から表 3 のとおり設定した。

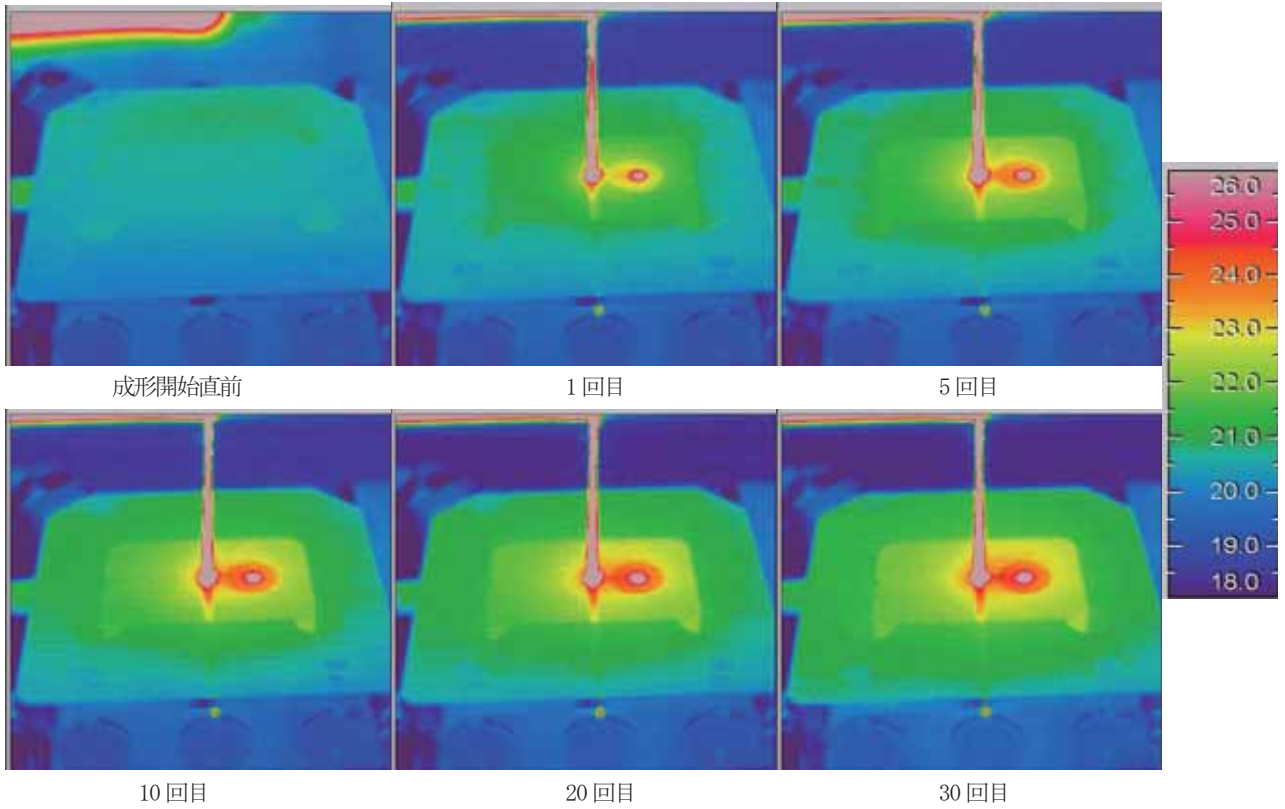


図14 パーティング面および成形品の成形回数ごとの温度分布（金型温調 20℃の場合）

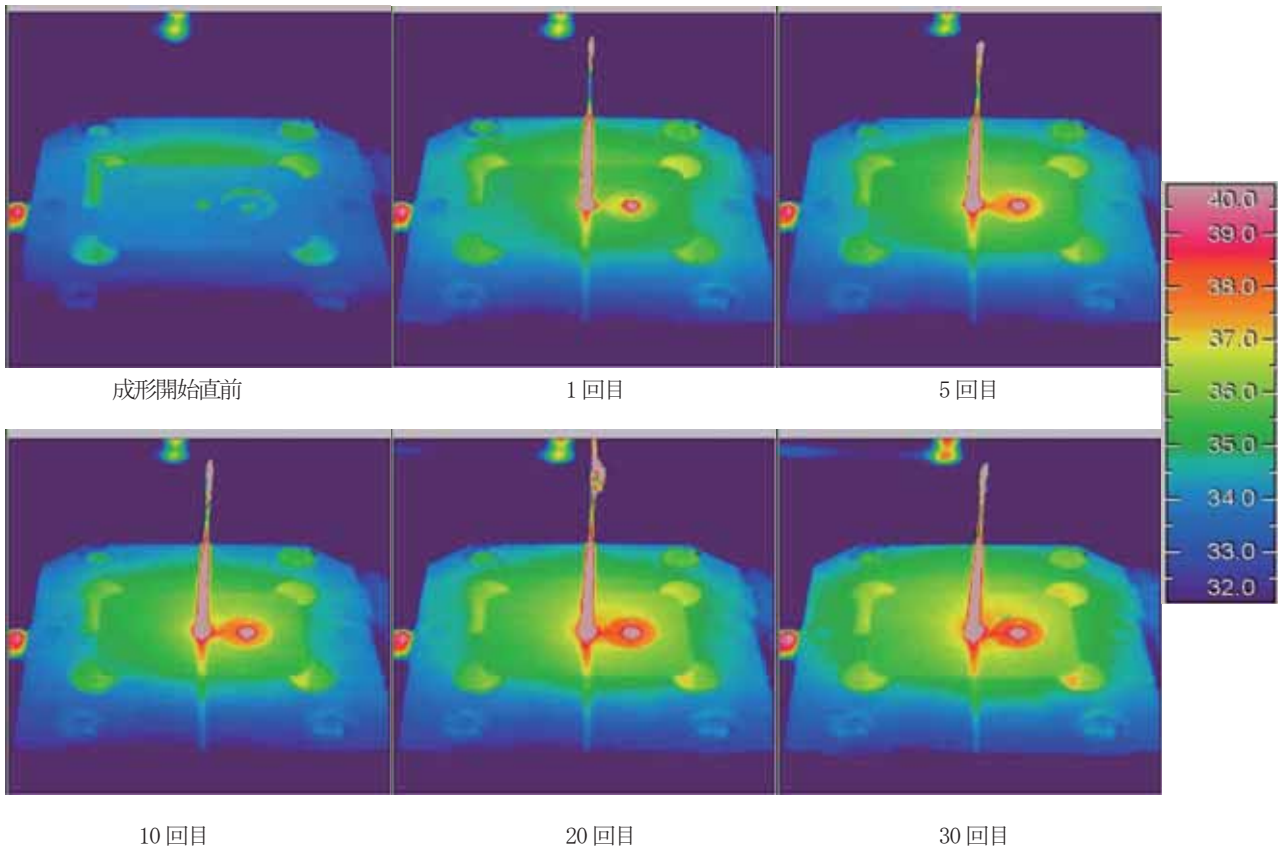


図15 パーティング面および成形品の成形回数ごとの温度分布（金型温調 40℃の場合）



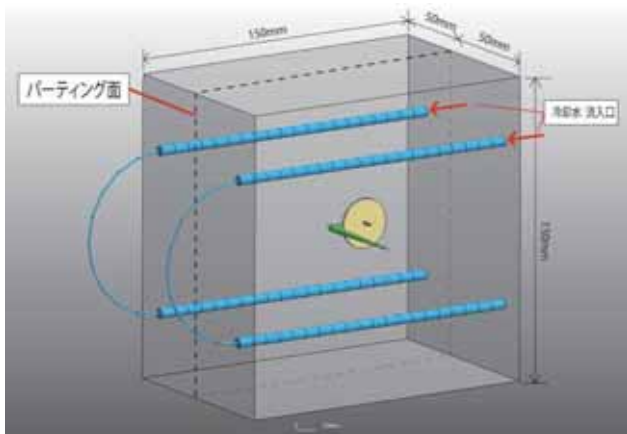


図 16 非定常金型冷却解析の解析モデル

表 2 解析条件

共通条件	使用樹脂	STATOIL社L600 (※1)
	金型材料	ブリハー ドン鋼 (※1)
	射出温度	200℃
充填解析条件	射出速度	25 mm/sec
	射出圧力	49MPa (500 kg/cm <sup>2</sup> )
保圧冷却解析条件	保圧	29.5MPa (250 kg/cm <sup>2</sup> )
	冷却時間	10秒
非定常金型冷却解析条件	サイクルタイム	60秒
	サイクル数	40
	冷却水流量	20 l/min
	固体接触面の熱伝達係数	80W/m <sup>2</sup> /K <sup>4)</sup>
	外気接触面の熱伝達係数	6W/m <sup>2</sup> /K <sup>5)</sup>
	外気接触面の輻射率	0.6 (※2)

※1：3D TIOMN 9.3 のライブラリから選択

※2：3D TIOMN 9.3 のデフォルト値

表 3 実測結果に基づく非定常金型冷却解析の温度条件

金型温度の設定		①20℃の場合	②40℃の場合
金型流入部の冷却水温度		22℃	40℃
金型初期温度		20℃	34℃
金型表面の外部温度	成形機取付面 (可動側)	10℃	10℃
	成形機取付面 (固定側)	10℃	10℃
	下方ベース取付面	15℃	28℃
	側方ベース取付面	18℃	34℃
	上面 (外気接触)	18℃	16℃
	側面 (外気接触)	18℃	16℃

## 5-2 結果および考察

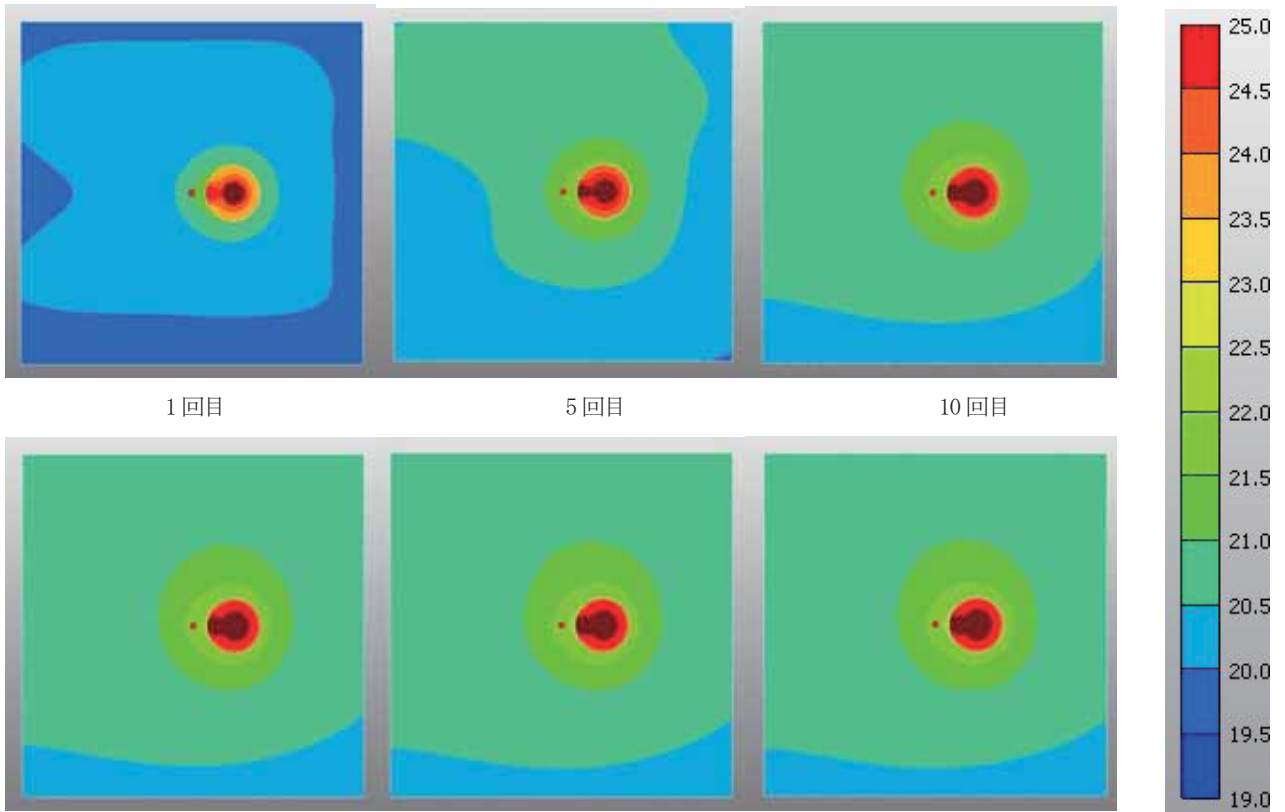
図 17 および図 18 は、それぞれ金型温度を 20℃および 40℃に設定した場合について、成形の充填・保圧・冷却が完了した瞬間のパーティング面 (可動側) および成形品の温度分布のシミュレーション結果である。

いずれの場合においてもパーティング面内の上下方向で比較すると、下部の温度が低くなる傾向があり、4-2 節で述べた実測結果と一致した。またパーティング面内の左右方向で比較した場合、成形回数が 30 回目の結果では、金型温度を 20℃に設定した場合には、右側 (側方ベースに接している側) の温度が低い、金型温度を 40℃に設定した場合には、左側 (外気に接している側) の温度が低くなっており、図 18 および図 19 に示した成形回数が 30 回目の実測結果と一致した。

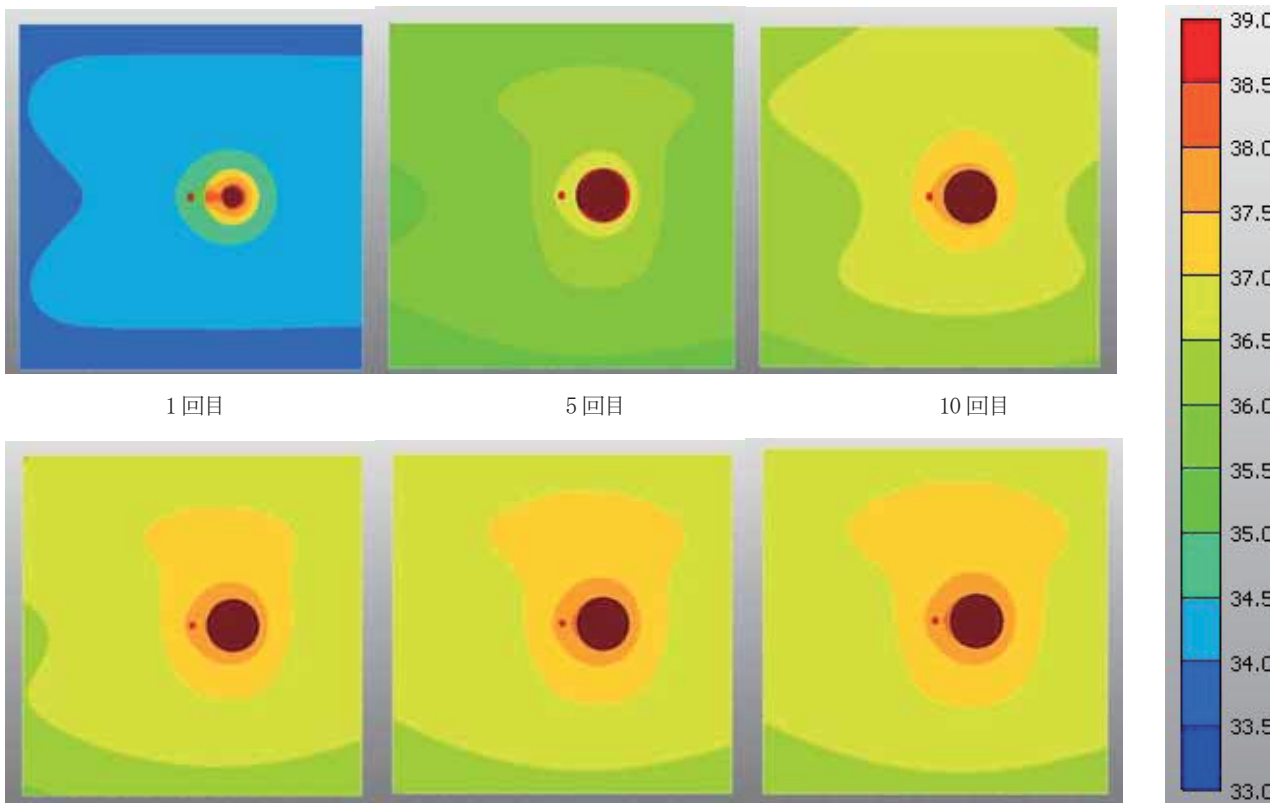
また図 19 に示すパーティング面上の 3 点について、金型温度を 20℃および 40℃に設定した場合の温度変化のシミュレーション結果を、図 20 および図 21 にそれぞれ示す。金型温度が 20℃設定の場合には、成形回数が 10 回目までの温度分布の変化が大きく、10 回目以降は安定している。金型温度が 40℃設定の場合には、成形回数が 15 回目までの温度分布の変化が大きく、15 回目以降は安定している。4-2 節で述べた実測結果と比較すると、温度が安定する成形回数についてはほぼ一致しており、金型温度が 40℃設定の方が温度が安定するまでの成形回数が多い傾向も一致した。

ただし、これらのシミュレーション結果は、実測結果に基づく表 3 に示した解析条件を設定することにより得られている。3 章および 4 章で述べたとおり、金型全体が一定の温度ではなく、また金型外部との吸放熱の影響が大きいため、解析精度を向上させるためには、金型外部との境界について実測した温度条件を使用することが重要であると考えられる。

非定常金型冷却解析により、パーティング面の温度分布の傾向や、温度が安定するまでの成形回数を予測できることがわかった。



1回目 5回目 10回目  
15回目 20回目 30回目  
図17 成形回数ごとの温度分布のシミュレーション結果（金型温度調 20°Cの場合）



1回目 5回目 10回目  
15回目 20回目 30回目  
図18 成形回数ごとの温度分布のシミュレーション結果（金型温度調 40°Cの場合）





図 19 温度の経時変化シミュレーション結果の評価位置

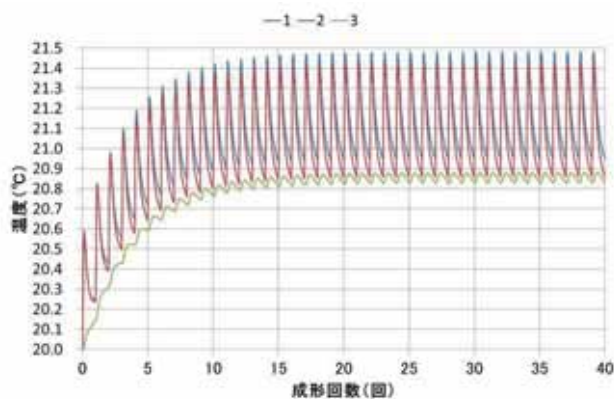


図 20 温度の経時変化シミュレーション結果  
(金型温調 20°Cの場合)

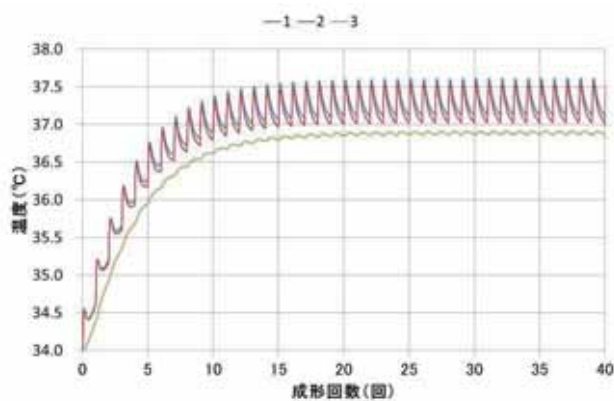


図 21 温度の経時変化シミュレーション結果  
(金型温調 40°Cの場合)

## 6. 結 言

黒体スプレーを表面に塗布して輻射率を大きくすることで、赤外線サーモグラフィにより金属表面の温度分布を、熱電対による測定と同程度の精度で測定できることを確認した。

この方法を用いて、射出成形時のカセット型のパーティング面（可動側）および成形品の温度分布を赤外線サーモグラフィにより測定したところ、固体と接触している金型表面は放熱しやすいため、金型温調を行っていても、パーティング面の温度分布に偏りが発生することがわかった。本報で使用したカセット型の場合は、カセットとベースの接触面がある下部の温度が低くなる傾向があった。また入れ子と母型の境界面に温度差が生じることを確認した。

射出成形開始後の数回の成形で、パーティング面の温度分布は定常状態となるが、本報で使用したカセット型の場合、定常状態となる成形回数は、金型温調を 20°C に設定した場合は 10 回、金型温調を 40°C に設定した場合は 20 回であった。なお温度分布が安定するまでの回数は金型構成や実験条件により異なるため、実測が難しい場合には金型冷却解析などの CAE を活用することが有用である。

また射出成形シミュレーションソフトウェアによる非定常金型冷却解析において、金型外部との境界について実測した温度条件を入力することにより解析精度が向上し、パーティング面の温度分布の傾向や、温度が安定するまでの成形回数がある程度予測することができた。

## 参考文献

- 1) 廣恵章利, 深沢勇: やさしいプラスチック金型 (改訂第 10 版), 三光出版社, P.84-87(2004)
- 2) 廣恵章利, 深沢勇: やさしい射出成形 (新版), 三光出版社, P.78-80(2005)
- 3) 西川兼康, 藤田恭伸: 伝熱学, 理工学社, P.302 (1982)
- 4) 東レエンジニアリング(株): 3D TIMON FEB.2012 Command Reference, P.5-39 (2012)
- 5) 西川兼康, 藤田恭伸: 伝熱学, 理工学社, P.81(1982)