

プラスチック射出成形の金型温度についての研究（第2報）

西村 通喜・阿部 治・寺澤 章裕・山田 博之

Study on Die Temperature of Plastic Injection Molding (2nd Report)

Michiyoshi NISHIMURA, Osamu ABE, Akihiro TERASAWA and Hiroyuki YAMADA

要 約

本研究は、金型の温度分布の不均一性の改善と冷却管の改良による冷却効率の向上を目的とした。特に、入れ子構造金型の温度が不均一になる問題について検討を行った結果、金属界面での熱伝達不足が原因と考えられ、金型同士の密着面に熱伝導グリスを塗布することで、金型温度分布を改善することができた。このことにより、射出成形シミュレーション結果に近づき、有用性が高まった。また、従来の冷却管に付加する新規の方法により、金型の冷却箇所の分布を変更でき、効率的な熱交換をおこなうことにより、金型の温度上昇を抑えることができた。

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なり生じると、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¹⁾。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、過去の経験の裏付けに基づいて条件を決めているという現状がある²⁾。

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、前報³⁾で明らかとなった入れ子構造金型の金属界面での熱伝達不足による金型温度の不均一性の改善と冷却管の改良による冷却効率の改善を目的に検討したので報告する。

2. 金型境界面での熱伝達

2-1 実験方法

前報で、射出成形金型のパーティング面での温度分布について計測を行ったところ、シミュレーションとは異なる結果となった一因として、金型の構造が考えられる。金型は、シミュレーションでは一体として計算されていたが、実際には、複数の部品で構成されている。このため、個々の金型部品の境界面では、熱伝達が阻害され、金型冷却の問題点となっている。

金属部品境界面での熱伝達を評価するために、図 1 のような装置を用いて検証を行った。この装置は、下部に埋設された電気ヒータを一定出力の電源で加熱させ、その時の温度をデータロガー(横河電気(株)製 XL100)で計測記録した。この時の熱電対 T1, T2 の温度差を用いて、各境界面の熱伝達の比較を行った。

実験に用いた金属は、S50C 製でブロック中央部まで熱電対が挿入してある。加熱用のブロック (50×60×20mm) 表面は、平面研削仕上げ (Ra0.7μm) になっており、被加熱用ブロック (50×60×60mm) 表面は、同様の研削仕上げとフライス切削仕上げ (Ra3.1μm) の 2 種類を用いた。二つのブロックの締結は、4 本の M4 ねじに約 2N・m のトルクを掛け締結させたものを「トルク有」とし、自重のみで置き重ねたものを「トルク無」とした。今回実験に用いた熱伝導グリスは、白色のグリス (サンハヤト(株)製 SCH-20: 熱伝導率 0.84W/m・K) を「白」とし、銀色のグリス (サンワサプライ(株)製 TK-P3S: 熱伝導率 6.5W/m・K) を「銀」とした。

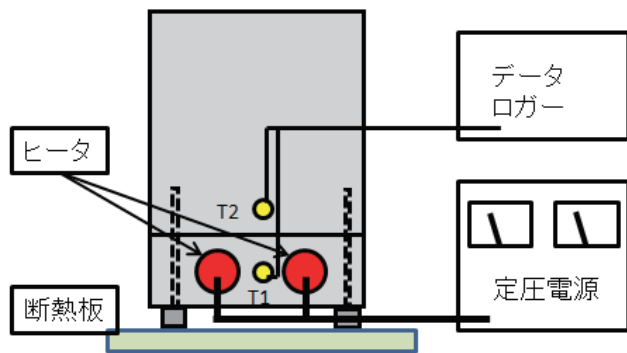


図 1 実験装置概要

2-2 結果および考察

各条件毎の加熱時間と温度差の関係を図 2 に示す。この結果、加熱 10 分後からほぼ安定した温度差で推移していることがわかった。また、加熱時間が約 90 分で温度 (T1) は 90℃以上に達するため、実験を終了した。加熱時間 20 分後から 80 分までの平均温度差を表 1 に示す。

この結果より、フライス切削面と平面研削面の両ブロックともトルクを掛けることで、温度差が小さくなった。これは、両ブロックが密着され、熱伝達が促進されたと考えられる。また、トルク無の場合、ブロック界面にグリスを塗布することにより温度差が小さくなり、グリスの熱伝導率が高い方が効果があることがわかった。トルクを掛けない場合とは、ポケット加工を行った母型に入れ子金型を入れた場合の側面を想定しているため、グリス塗布の効果が高いと考えられる。

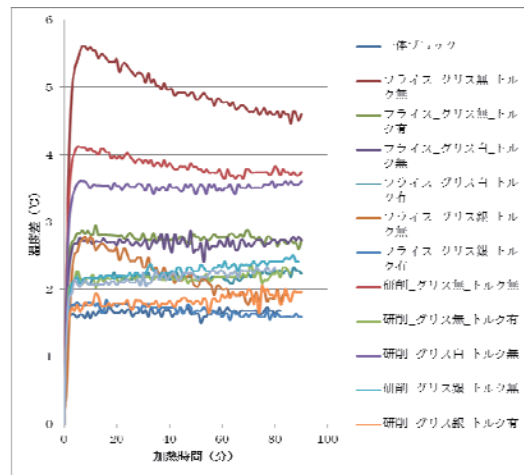


図 2 加熱時間と温度差の関係

表 1 加熱時間 (20 分～80 分) の平均温度差 (単位℃)

①一体ブロック		1.66			
②分割ブロック					
	フライス切削面		平面研削面		
	トルク無	トルク有	トルク無	トルク有	
グリス無	4.90	2.77	3.80	2.18	
グリス白	2.68	2.19	3.51	2.20	
グリス銀	2.14	1.68	2.30	1.83	

3. 射出成形金型における熱伝達

3-1 実験方法

第 2 章で得られた熱伝達の改善方法を実際の射出成形金型に適用し、その有用性の検証を行った。実験は、射出成形機 (ファナック(株)製 ROBOSHOT α-30C) と、前報第 4 章で使用した金型を用いた。この金型は、図 3 のような入れ子構造になっており、この入れ子境界面に第 2 章の「銀」グリスを塗布し、効果を検討した。金型の温度は、金型温調機 ((株)カワタ製 DR-15Z-TW) を用いて、20℃で温度管理を行った。温度測定は、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、赤外線サーモグラフィ (NEC Avio 赤外線テクノロジー(株)製 G100) で測定した。

金型の表面温度が安定したのちに、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 2 に示す成形条件により射出成形を行った。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図 4 のように金型下方より測定した。なお、イジェクト機能は使用していないため、サイクルタイムは手動で計測し、成形品を手動で取り出した。成形のサイクルタイムは、おおむね 45 秒程度であった。

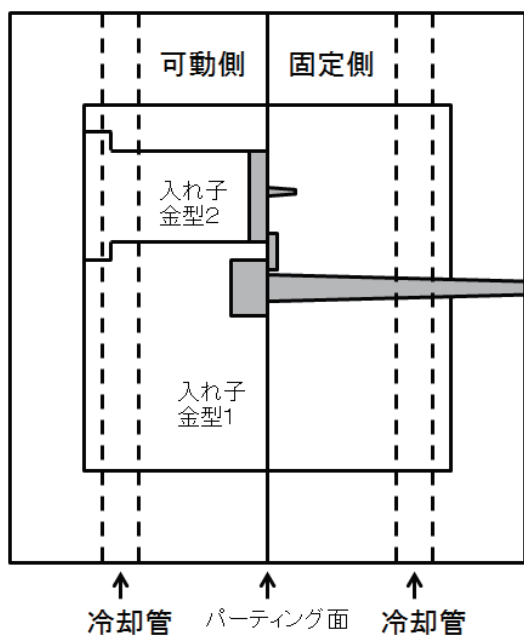


図3 入れ子金型概要

表2 主な成形条件

射出速度	25 mm/sec
射出圧力	500 kg/cm ² (49MPa)
保圧	250 kg/cm ² (29.5MPa)
冷却時間	10秒
成形温度 (ノズルヒータ部温度)	200℃

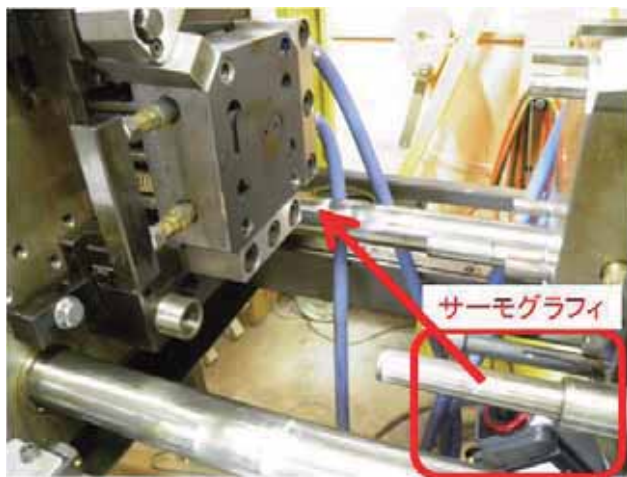


図4 赤外線サーモグラフィの設置位置

3-2 結果および考察

金型が開いた直後の可動部面をサーモグラフィで測定した結果を図5に示す。前報のシミュレーション結果より、製品円盤部のキャビティー面が、最も高温になると予測される。しかし、キャビティー部には、まだ製品が

残っているため、キャビティー部の温度はこの結果から読み取れない。そのため、キャビティー部周辺温度を比較すると、グリスを塗布した場合は、周辺部が広範囲にわたり温度上昇している。これは、構造上キャビティー底面部は入れ子金型2となっているため、グリスを塗布したことにより、周辺金型である入れ子金型1に熱が伝わっていると考えられる。また、入れ子金型1は、冷却管の通っている母型との境界で温度差がはっきりと観察できるのに対し、グリスを塗布した金型は、温度境界がぼやけている。これも、同様にグリスによる熱伝導の効果が現れていると考えられる。

金型は、成形により熱交換が行われ、樹脂に接している部分が加熱される。その熱は、金型内を伝導し分散され、やがて一定温度の冷却水により熱交換が行われる。そのため、金型の構造により熱伝導が阻害されると、部分的に熱がこもり、金型内温度の不均一が生じる。金型温度の均一性を高めるためには、グリスの塗布が有効であると考えられる。

この結果より、前報で報告した射出成形シミュレーションの結果に近くなり、温度予測においてシミュレーションの有効性が確認された。

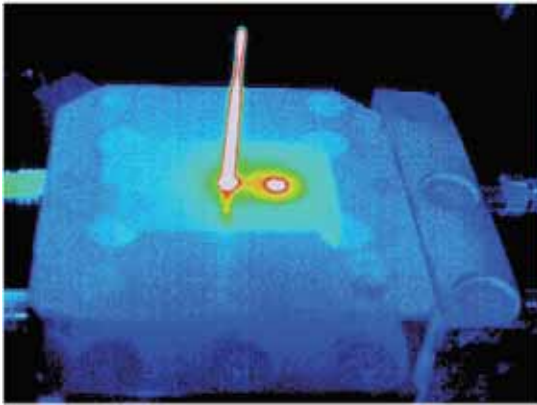
4. 新冷却管構造による温度分布

4-1 実験方法

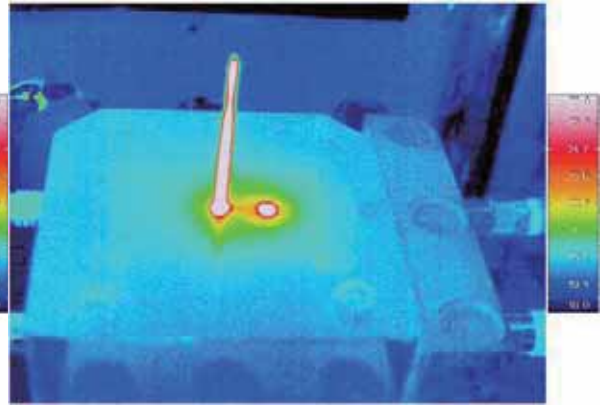
射出成形金型は、高温で溶融された樹脂を冷やし固める一種の熱交換器の役割を持つ。このため、金型には、温度を一定に保つ冷却管という媒体を通す流路が設けられている。この冷却管は、本来、金型の加熱される製品部分にむらなく配置するのが理想的である。しかし、冷却管の設置場所は、金型の持つ他の機能（エジェクト機能等）が優先され、製品部周辺に配置せざるを得ず、加工上の都合で単純な形状しかないのが現状である。このため、従来のような単純な形状の冷却管でも、効率的な熱交換を行うことを目的とした。

図6のような、金型を模したS50C製ブロック（200×200×30mm）の厚さ中心部分に100mmの間隔で冷却管（直径10mm）が2本通してある試験片を用いた。室温に放置した試験片に、金型温調機で一定温度にした水（70℃）を循環させ、表面温度分布の変化をサーモグラフィで計測した。試験片表面は、計測を行うため黒体スプレーで塗装した。

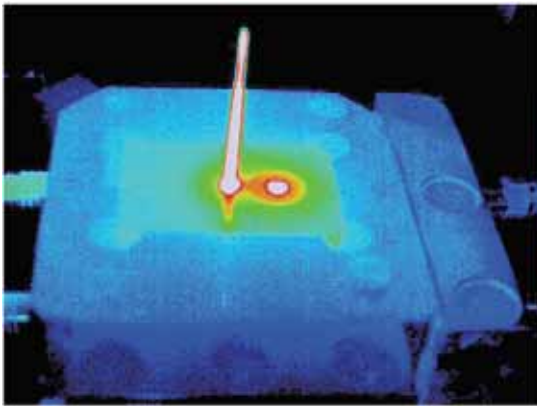
金型は、中心部分に製品形状を設ける場合が多いので、金型中心部分をより冷却する方法として、図7のように流路の一部を細く絞ったものや流路内に駒を入れ流路の断面積を少なくした流路を用いた。



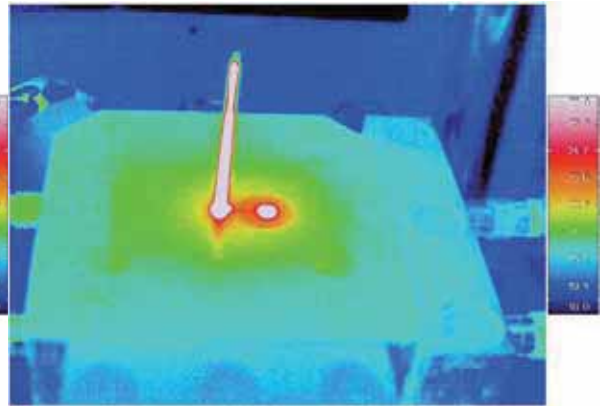
グリス無 成形3回目



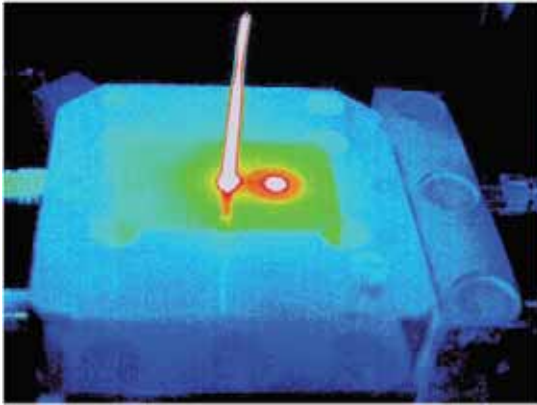
グリス有 成形3回目



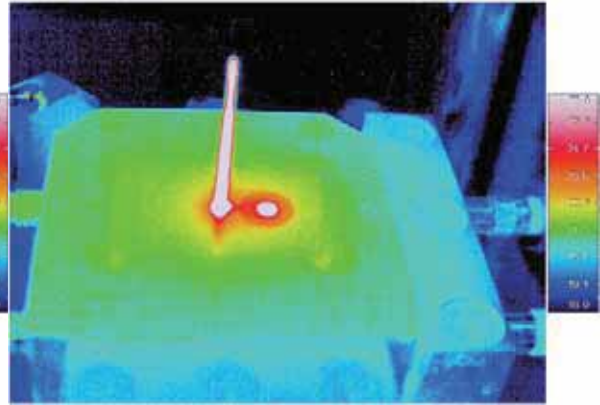
グリス無 成形10回目



グリス有 成形10回目



グリス無 成形30回目



グリス有 成形30回目

図5 赤外線サーモグラフィ測定結果

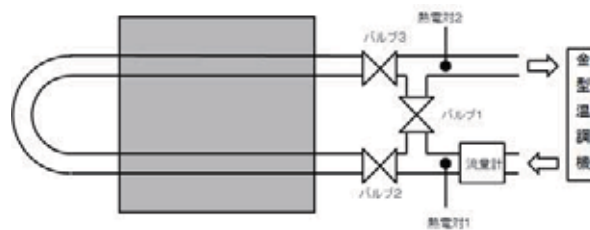


図6 模擬金型実験概要

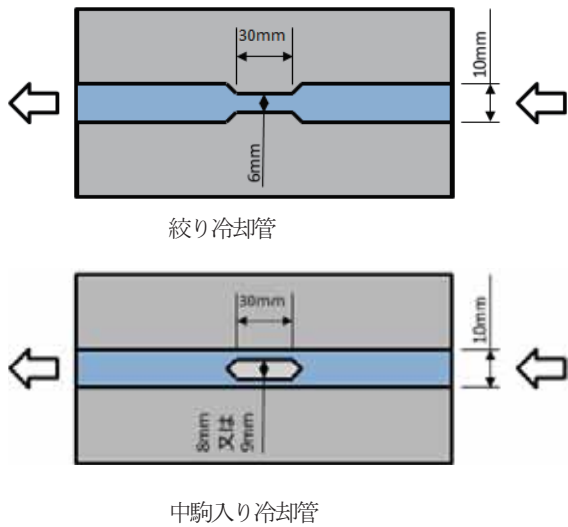


図7 金型流路概要

4-2 熱流体シミュレーション

この実験について、コンピュータシミュレーションにより実現象を精度よく予測できるか検証した。熱流体シミュレーションソフトウェアには、ANSYS CFX14.5 を使用し、図6で測定した流速、水温を与え解析を行った。実際は、試験片に温水を通した直後は、水温は下がるが、解析上は、一定温度で流入するものとした。また、金型外部の接続管は断熱とした。

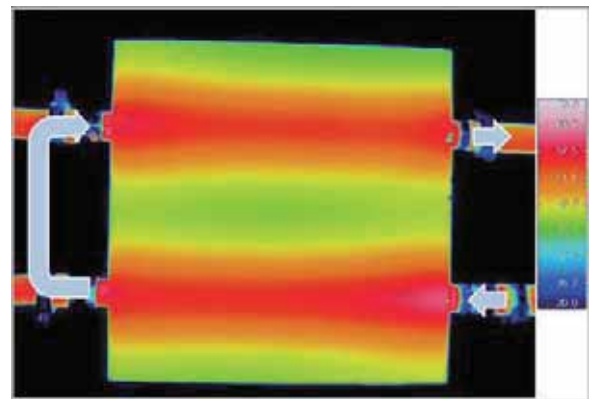
4-3 結果および考察

試験片のサーモグラフィ測定結果を図8に示す。測定結果は、長時間実験を行うと金型表面が均一温度になるので、変化量を大きく表示するために途中経過を示した。

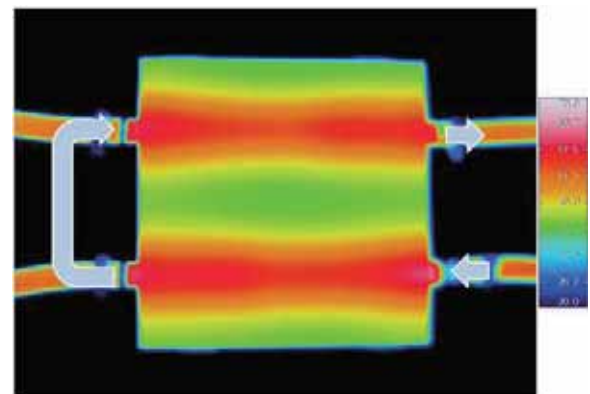
ストレート冷却管の場合、温水が試験片内に流入した直後部分が最も加熱され、徐々に全体的に加熱が拡散される。

冷却管の一部を絞った場合、部分的に媒体の流速が速くなり、熱交換が促進されると考えられる。部分的に直径10mmを6mmに絞った冷却管と、内径8mmの中駒を入れたものは、流路の断面積がほぼ同じであるが、試験片と冷却管の接触面積が約1.7倍広いので、中駒入り方式が効果的に加熱部分を移動できる。また、内径8mmと9mmの中駒を入れた冷却管の場合、流速が速くなる9mmの中駒を入れた冷却管の方がより加熱部分が移動できることがわかった。

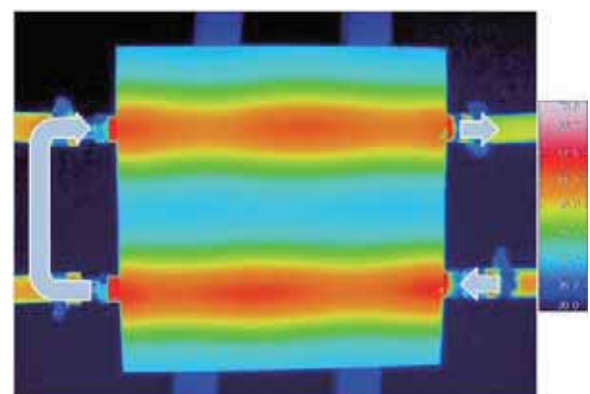
熱流体シミュレーション結果を図9に示す。測定結果とシミュレーション結果はほぼ同様の結果を得ることができたが、試験片の再度流入時の攪拌は考慮されていないため、若干の違いがあった。これにより、冷却管の流路形状を変えることによる温度変化の予測が可能であることがわかった。



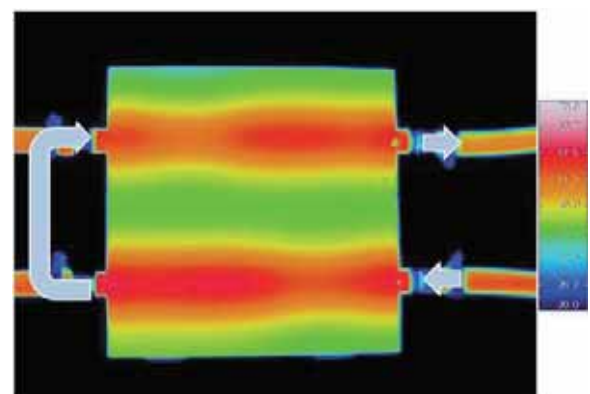
直径10mm ストレート冷却管



直径10mm 6mm 絞り冷却管

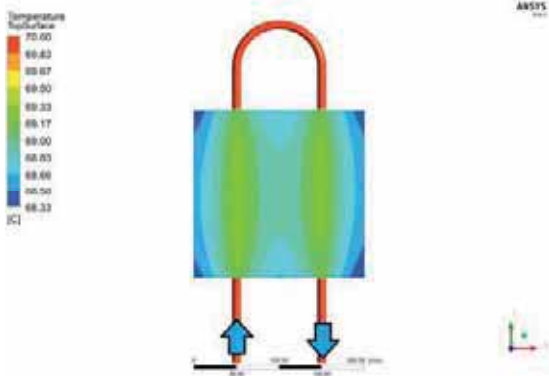


直径10mm 中駒8mm 冷却管

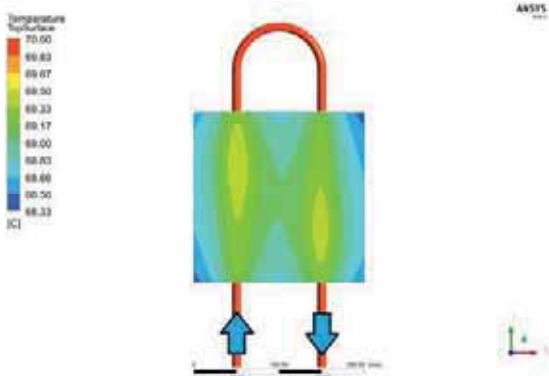


直径10mm 中駒9mm 冷却管

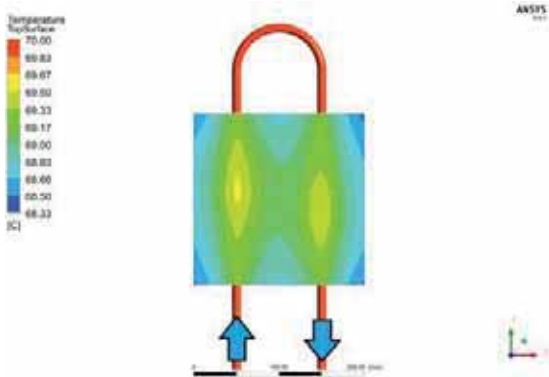
図8 模擬金型サーモグラフィ測定結果



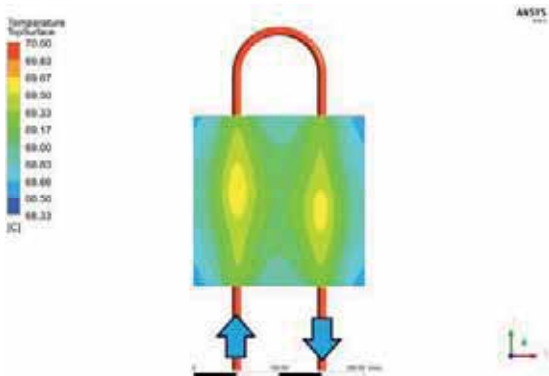
直径 10mm ストレート冷却管



直径 10mm 6mm 絞り冷却管



直径 10mm 中駒 8mm 冷却管



直径 10mm 中駒 9mm 冷却管

図 9 シミュレーション結果

5. 新冷却管構造による射出成形

5-1 実験方法

第 4 章で得られた新冷却管方法を実際の射出成形に適用し、その有用性の検証を行った。金型は、図 10 のようなスパイラルフロー状キャビティー（幅 3.8×深さ 1.5mm）の 4 か所に熱電対が露出してあり、樹脂表面温度が測定できる構造になっている。この温度測定は、データロガーを用い 200ms 間隔で記録した。金型の表面温度が安定したのちに、低密度ポリエチレン（日本ポリケム(株)製ノバテック LD）を用いて、表 3 に示す成形条件により射出成形を行った。なお、イジェクト機能は使用していないため、サイクルタイムは手動で計測し、成形品を手動で取り出した。

金型は、直径 6mm の冷却管が 2 本設けてあるものと、キャビティー部分の熱交換が大きくなるように冷却管の途中に中駒（直径 5mm、長さ 30mm）を設置したものを使用した。

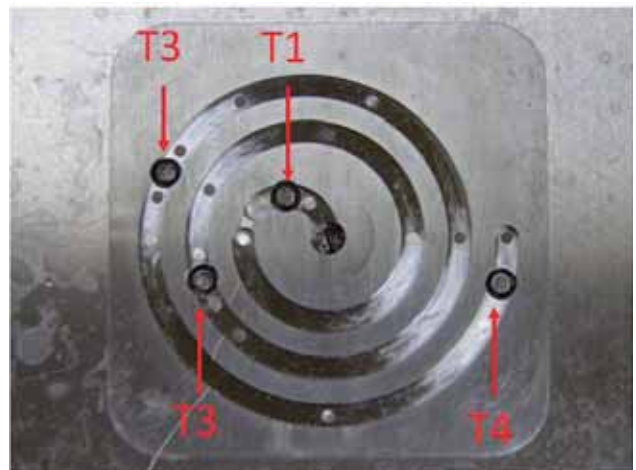


図 10 スパイラルフロー金型

表 3 主な成形条件

射出速度	40 mm/sec
射出圧力	850 kg/cm ² (83.3MPa)
保圧	600 kg/cm ² (58.8MPa)
冷却時間	15秒
成形温度 (ノズルヒータ部温度)	220℃
金型冷媒温度	50℃
サイクルタイム	約45秒

5-2 結果および考察

表 3 の射出条件で 40 回射出成形を行ったときの温度 T1 の温度履歴を図 11 に示す。温度 T1 は、金型中央部に

あり、冷却管から最も遠く、熱がこもりやすい位置にある。また、高温の樹脂が流れ込む場所であるため、金型が高温になる場所である。温度 T1 は、成形回数を重ねるごとに金型温度は徐々に上昇してき安定する。金型の初期温度からの温度変化を図 12 に示す。通常冷却管と比較して、新規冷却管は温度上昇が少ない結果となった。これは、冷却管の効果による熱交換が促進された結果と考えられる。

1 回あたりの熱履歴を見るために、金型を閉じた状態で 3 分間の冷却時間を取った場合で複数回成形を行った結果を図 13 に示す。金型内に樹脂が徐々に流入するために T1 から T4 の温度上昇は、時刻差が生じ、射出位置から遠くなるにつれ、樹脂温度は低くなる。この場合においても、新規冷却管のほうが冷却速度が速い。また、T1 から T4 全ての温度が、初期値に対し、1°C 以内に冷却される時間をみると、通常冷却管の場合 40 秒近くかかるのに対し、新規冷却管は 21 秒と早く、樹脂全体が冷却されているのがわかった。このことにより、新規冷却管による冷却効果が現れていると考えられる。

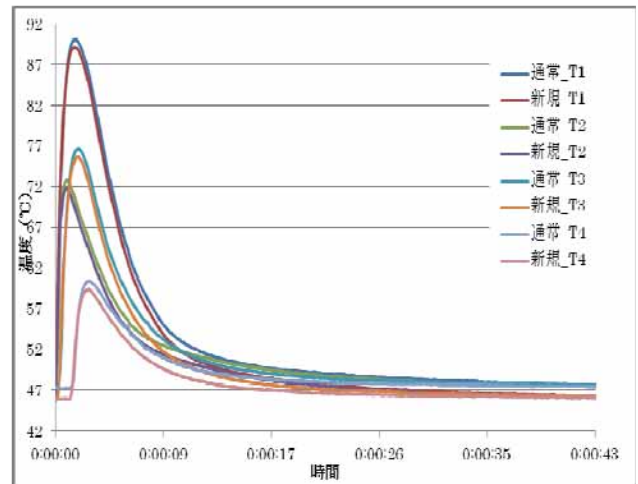


図 13 冷却時間 3 分で成形時の温度結果

6. 結 言

入れ子構造の金型に起こる問題として、金型接触界面に起因する伝熱障害を改善すべく、検討を行った。その結果、金型同士の密着や電子部品用の熱伝導グリスを界面に塗布することで、熱伝達が向上することがわかった。この方法を用いて、射出成形時の金型パーティング面（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、パーティング面の温度分布の偏りが改善でき、射出成形シミュレーションと整合性のある結果となった。

また、従来の金型冷却管に中駒を付加する新しい方法により、金型の加熱部を局部的に熱交換を促すことができ、金型の温度上昇を抑えることができることがわかった。このため、射出成形のサイクルタイムを短縮できる可能性があり、生産性の向上が望める。

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) 阿部治, 寺澤章裕, 山田博之, 西村通喜: 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), 山梨県富士工業技術センター平成 23 年度業務・研究報告, P.27-31(2012)

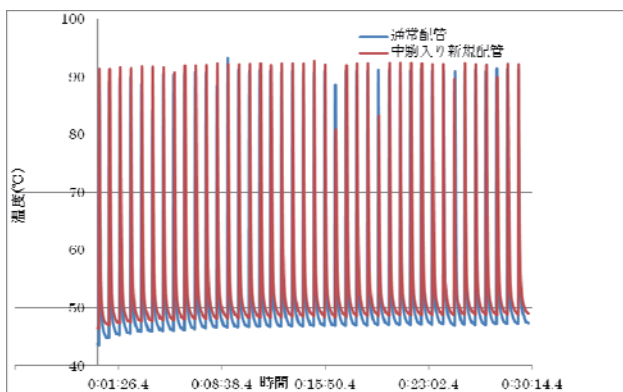


図 11 40 回成形時の温度 T1 の結果

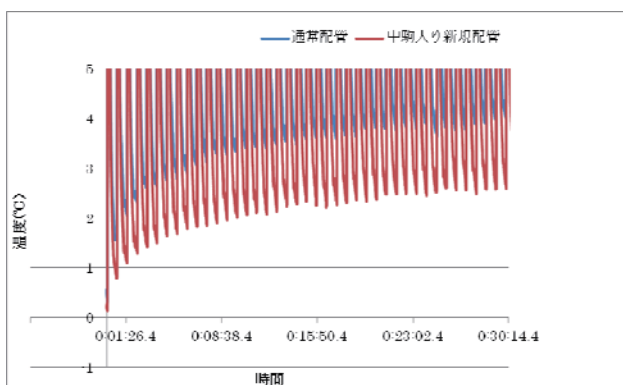


図 12 40 回成形時の温度 T1 の初期温度からの変化量