

外装用樹脂強度部品に適用可能な高速金型加熱冷却成形に 用いる金型温調回路設計手法の確立

Establishing Design Method for Mold Temperature Control Piping of Rapid Heat and Cool Molding
Used for Fabrication of High Strength Exterior Resin Parts

杉 生 大 輔¹

Daisuke SUGIO

要 旨

外観性が求められる自動二輪車の樹脂強度部品を量産するため、廉価なガラス繊維強化ポリプロピレンでのヒート&クール成形法を検討した。成形サイクルタイムと温度均一性を両立するために、三次元曲面に沿った温調回路を採用し、テストピース実測に基づいた検討により配管の基本仕様を決定する考え方を整理した。また、理想的な配管設計ができない箇所に対して、キャビティ表面温度分布が検証可能な伝熱シミュレーション手法を開発した。その際、ボイラの飽和蒸気を熱媒体として用いるシステムに対し、熱媒体を熱水と仮定する簡易的手法が有用であることを示した。

ABSTRACT

Assuming the mass production of good appearance and high-strength plastic parts to be used on motorcycles, we studied the Heat and Cool (H&C) molding method to fabricate low-cost glass fiber reinforced polypropylene parts. In order to satisfy both molding cycle time and mold surface temperature uniformity requirements when temperature control piping are laid along a three-dimensional surface of a mold cavity, we used actual measurements made on test pieces to systematically define basic specifications for the piping arrangement. In addition, to deal with portions where an ideal piping design cannot be made, we developed a heat transfer simulation method that can effectively determine the surface temperature distribution of a mold cavity. With this, for a system that uses saturated steam from a boiler as the heating medium, it was indicated that a simple method to assume hot water for the heating medium can in fact be quite useful.

1. まえがき

自動二輪車は、中国、インド、タイ、インドネシア、ベトナムなどアジアを中心とする地域で広く利用されており、その経済発展に伴い大きな市場を形成している。これらの地域では交通インフラが十分に整っていないこともあり、自動二輪車は重要な移動手段であり、また、荷物を運搬するための手段としても広く用いられている。近年、市場が成熟するにつれて実用性のみならず、意匠性がこれまでよりもいっそう求められるようになってきている。そのため、自動二輪車の外装部品には高い生産性と形状自由度が

求められるようになり、樹脂射出成形品が広く用いられるようになった。

強度が求められるリヤグラブルールやキャリアは、従来、鉄パイプやアルミのダイカストを用いて製造されてきた。近年ではこれらの部品もガラス繊維強化樹脂を用いた樹脂化がおこなわれている。ガラス繊維強化樹脂は、マトリクスとなる樹脂にガラス繊維を混合して強度、弾性率を向上させた樹脂材料である。ガラス繊維は強化材として優れているが、一方で、成形品表面に混合したガラス繊維が露出してしまうことから、ガラス繊維樹脂を用いて高い外観品質の製品を作成することは一般的には容易ではない。そこ

¹ 本田技研工業株式会社

で、樹脂の改良、もしくは、塗装などによる隠ぺいの手法がこれまで広く用いられてきた。例えば、ガラス繊維強化ポリアミド (PA-GF) は、樹脂の改良によりガラス繊維露出を抑えることが可能である。

しかしながら、樹脂の改良による手法では素材コストが高くなってしまい、また、塗装は多くの工程を必要とすることから、生産性に課題を生ずる。そこで本研究においては、マトリクス樹脂としてより廉価なポリプロピレンをガラス繊維で強化した、ガラス繊維強化ポリプロピレン (PP-GF) の適用を検討した。一般に、PP-GF を従来の射出成形法で成形した場合には、要求される外観を十分に満足することができない。これは、PP-GF の結晶化速度が速くガラス繊維が露出したまま表層が固まってしまうためである (Fig. 1)。そこで、ヒート & クール成形法 (H&C 成形法) により、塗装なしで外観性を満足させる量産手法の確立を目指した。

H&C 成形は、同一成形サイクル内で金型のキャビティを蒸気などの熱媒体で加熱し、成形後に水などの冷媒で冷却する成形手法である。必要な温度まで金型が加熱された後、樹脂を型内に充填して成形をおこなう。高い金型温度で成形することで樹脂の固化が遅延され型転写が良くなり、繊維露出やウエルドのない高外観な成形品が得られる。ただし、生産性の要求から加熱・冷却サイクルを短縮していくと、キャビティ表面温度のムラが大きくなっていき、外観のムラやガス焼けやバリ等の成形不良が発生してしまう。よって、キャビティ表面温度のムラを小さくする

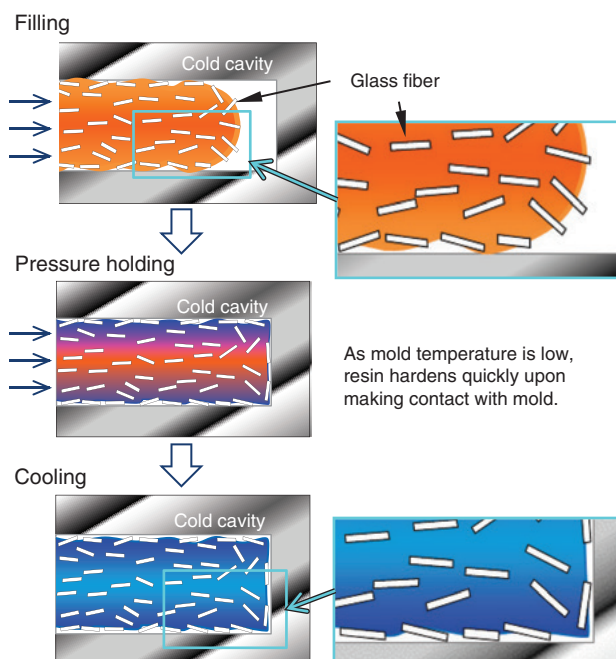


Fig. 1 Exposure of glass fibers on surface of glass fiber reinforced plastic molded by conventional injection molding

ための金型温度制御設計手法の確立が課題である。

本研究では、金型キャビティ表面温度の予測技術として、テストピース実測結果を用いた手法構築⁽¹⁾、シミュレーションによる手法構築⁽²⁾をおこなったので、それぞれについて4章、5章に記す。また、構築した手法の有効性についてリヤグラブレールを例として6章に記す。

2. 成形サイクルと金型キャビティ表面温度の目標値の設定

H&C 成形の金型加熱システムは、効率的な成形システムの構築のために電磁誘導加熱や高圧ボイラなどの特殊な設備を用いる場合もあるが、本研究ではさまざまな生産拠点への展開性を重視し、工場設備として普及している一般的なボイラの飽和蒸気を熱媒体として用いるシステムを採用した。また、生産性の要求より、成形サイクルの目標値は120秒以下と置いた。

成形品の外観品質を向上させるために必要なキャビティ表面の温度の範囲について、リヤグラブレールを模した肉厚のテストピースを成形する金型を製作し検証をおこなった。Fig. 2 に示すグラフは、金型のキャビティ表面温度を変化させて PP-GF を成形したときの、成型品表面の光沢の度合いと重量の変化を示す。光沢は ASTM D523 に基づき、入射角 60 度にて測定した値を示す。キャビティ表面温度が低いとガラス繊維が露出して光沢が得られない。また、キャビティ表面温度が高すぎると収縮が大きくなるため、重量が軽くなりヒケなどが生じ、強度不足の原因となる。したがって PP-GF を用いた成形においては、成形品のガラス繊維露出を抑えた上で、他の成形品質も満たすことが必要であるため、金型キャビティ表面の温度範囲をキャビティ全面にわたって 120 – 145°C の範囲にコントロールすることを目標値と設定した。

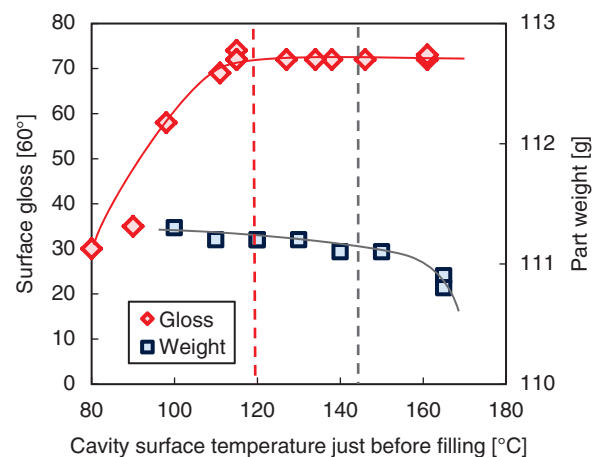


Fig. 2 Surface glossiness and weight of molded part in relation to different cavity temperatures

3. 三次元形状に対応した配管手法

キャビティ表面温度の加熱時の温度差を解決するには、加熱時の各キャビティ部位への熱の伝わりやすさを等しくするために温調配管からキャビティまでの距離を等しくすることが必要である (Fig. 3). これを実現するため、本開発ではモノリシックな金型ではなく、合わせ構造の金型によって温調配管を形成する手法 (Milled Groove Channel 法) を採用した (Fig. 4)⁽³⁾. この手法の採用によりキャビティ面の曲面に沿った配管を形成できるため、配管からキャビティ面までの距離を等しくすることができ、加熱時のキャビティ表面の温度上昇の時間差を低減できると考えた。また、曲面への追従性を向上させるために、配管の直径はできるだけ小さくすることと考えた。

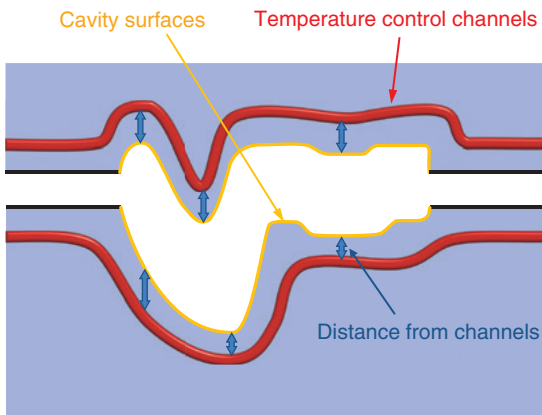


Fig. 3 Cross section of ideal Heat and Cool channels

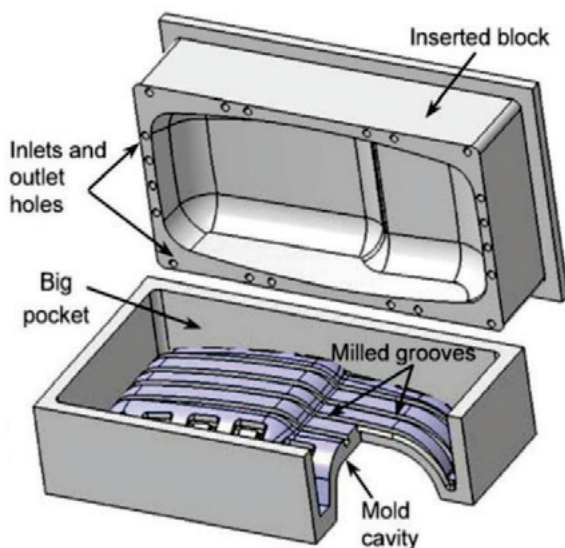


Fig. 4 Example of piping for cooling fabricated by Milled Groove Channel method

4. テストピース実測結果に基づく金型温調仕様の決定手法の構築

加熱冷却を短縮するためにはキャビティ表面近くに温調回路を設置するのが望ましいが、近すぎると配管のある場所とない場所の間に温度差を生ずる要因となる。そのため、この温度差を許容範囲内に抑えつつ効率的な加熱と冷却をおこなうことのできる、配管仕様を設定する必要がある。代表的なパラメータは四つあり、配管径 (D)、深さ (H)、ピッチ (P)、長さ (L) である (Fig. 5). これらについて、金型を模擬した構造モデルを用い、実測をおこなった結果に基づいて検討をおこなうことで金型温調仕様を決定する手法を構築した。以下、詳細に記す。

4.1. 配管径

三次元の曲面形状を持つキャビティ面に沿って配管を設置するためには、配管径が細いことが望ましいものの、配管径が細すぎると熱媒体の温度が下がってしまう。180°C の蒸気を用いたテストピースの昇温試験において、テストピースに設置した配管の蒸気の入り口と出口の温度差が、配管径に対してどのように変化するかを Fig. 6 に示す。グラフからわかるように、配管径 5 mm を下回ると入り口と出口の温度差が非常に大きくなる。一方、前述したとおり配管径はなるべく小さいほうが望ましい。そのため本検討においては、配管径は 5 mm とすることとした。

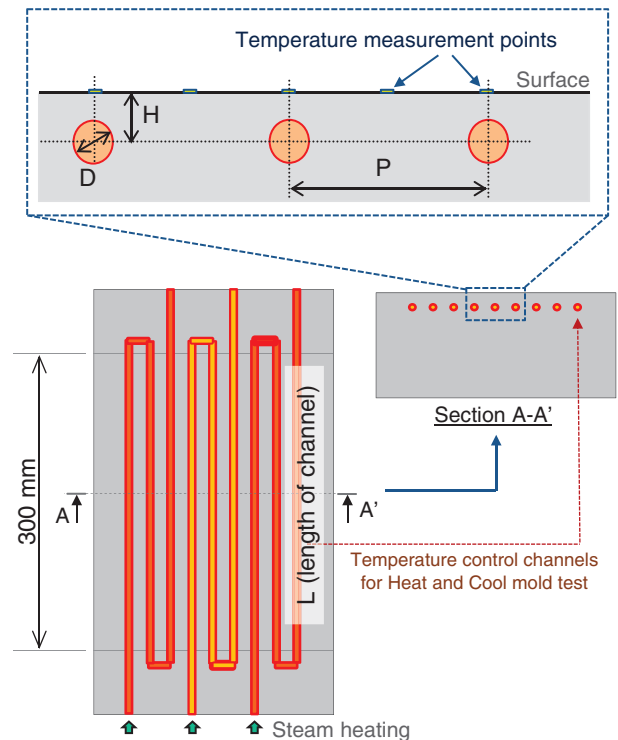


Fig. 5 Structure model of piping system for analytical investigation

4.2. 配管深さ

配管深さに対する、温調配管上のテストピース表面温度が120°Cに達するまでの時間をFig. 7に示す。深さが小さいほど温度上昇に要する時間は短くなる。しかし、配管の深さが小さくなると、金型の耐久性が低下する。そのため、金型の耐久性と生産性の要求から、本検討では配管深さは10 mmに設定した。

4.3. 配管長さ

配管径の検討と同様に、180°Cの蒸気を用いたテストピースの加熱昇温試験をおこない配管の長さの影響を確認した。配管長さは長いほどとりまわしの自由度が高くなるものの、長すぎると熱媒体が冷えて出口付近を十分に温め

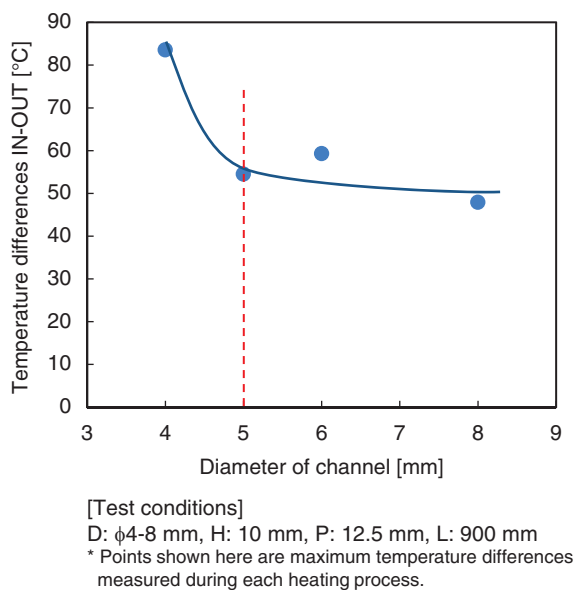


Fig. 6 Temperature differences between inlet and outlet

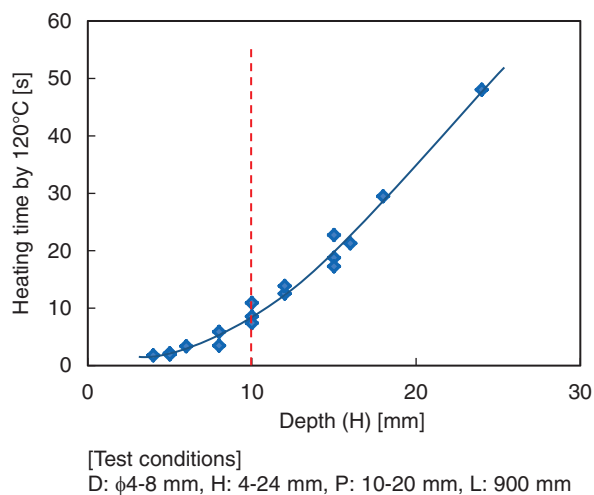


Fig. 7 Heating times to raise temperature from 40 to 120°C with different pipe diameters and pitches

られない。そこで、キャビティ表面を模したテストピース表面について、配管径路にそって温度を計測した。その結果をFig. 8に示す。ここに、図中のプロットは、本昇温試験において、温度上昇がもっとも早い点が130°Cに到達した時点での、各測定点の温度を示し、横軸は配管に沿って測定した配管の入り口からの距離を示す。このグラフより、配管長が1000 mmを越える部位での温度が低くなり、こうした部位において配管内を流れる蒸気の温度が低くなっていることが示唆される。この結果を踏まえ、また、前述したとおり、配管長はできるだけ長いほうが望ましいため、1000 mm以内と設定した。

4.4. 配管深さとピッチ

次に配管の深さとピッチについての検討をおこなった。Fig. 9に赤色で示したように配管の真上はもっとも温度が上がりやすく、青色で示した配管と配管の間部分部分は温度が上がりにくい。また、深さが小さければ温度上昇は速くなるが、温度が上がりやすい部分と上がりにくい部分の差が大きくなってしまふ。さらに、配管からキャビティ表面までが薄くなってしまふため、金型の強度が低くなる。一方、ピッチが小さければ赤と青の部分の温度差は小さくなるが、隣り合う配管が近くなり、金型強度が低くなってし

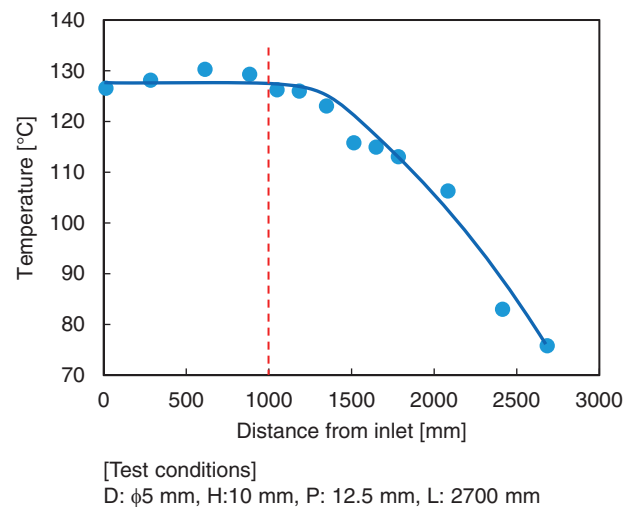


Fig. 8 Temperatures measured along channel on surface of structure model

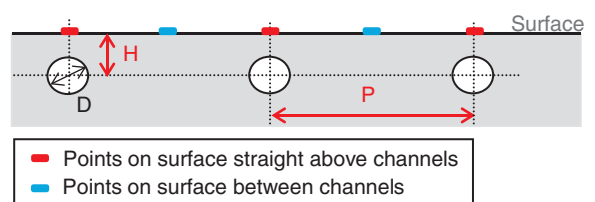


Fig. 9 Temperature measurement points on surface of structure model

まう。このように、深さとピッチの最適値はお互いの相対値によって決定され、その影響は Fig. 9 に示す赤色と青色の部分の温度差に現れる。そこで、深さとピッチの比 H/P に対するこの温度差を比較した (Fig. 10)。 H/P が 0.5 を下回ると温度差が大きくなる。また、 H/P が大きくなると温度差は小さくなり均一に表面が昇温されるようになる。一方で、昇温にかかる時間を短縮するためには、深さはなるべく小さいほうが望ましい。以上の事柄を勘案し、まず、深さとピッチの比を 0.5 から 1 の範囲に設定することとした。さらに、先に述べた、金型の耐久性からくる制約により、深さを 10 mm に設定したため、ピッチの範囲は 10 mm から 20 mm に設定することとなった。

4.5. 決定した配管の基本仕様

以上、温調配管仕様に起因する金型キャビティ表面の加熱時間と温度差を最少化する考え方を整理し、それに基づ

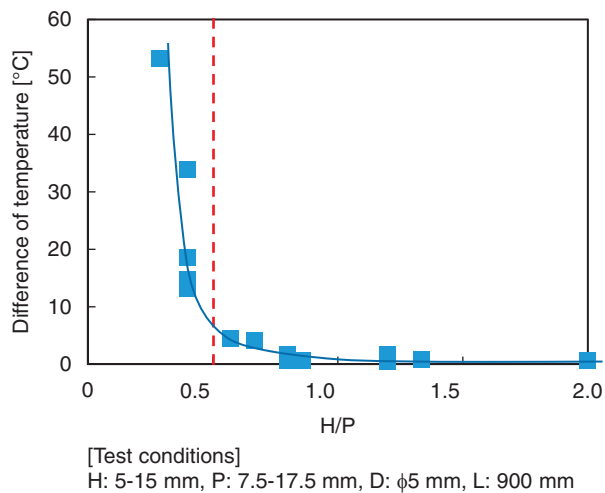


Fig. 10 Variation in deviations of cavity temperature in reference to ratio between H and P (H/P)

く実測結果からパラメータを設定した。 D は 5 mm, H は 10 mm, L は 1000 mm 以下, P は 10 から 20 mm (H/P は 0.5 から 1.0) とした。

5. キャビティ表面温度分布のシミュレーション

5.1. シミュレーション技術の必要性

実際の金型設計においては、金型組立てのための締結箇所や製品形状に起因する制約により、同じピッチで温調配管を配置するという理想的なとりまわしができない箇所が生ずる。このような部分は金型加熱時に十分な温度上昇が得られず、金型キャビティ温度が均一にならない原因となる。そのため、特別な設計を施さなければ、金型加熱時のキャビティ表面温度は不均一となる。そうした例を Fig. 11 に示す。赤線に示すように温調される箇所によって大きな温度差が発生している。このような温度差が発生する箇所の例について、その発生原因を示す図を Fig. 12 に示す。前述したとおり Fig. 12 (a) で示す部分では、金型組立てのた

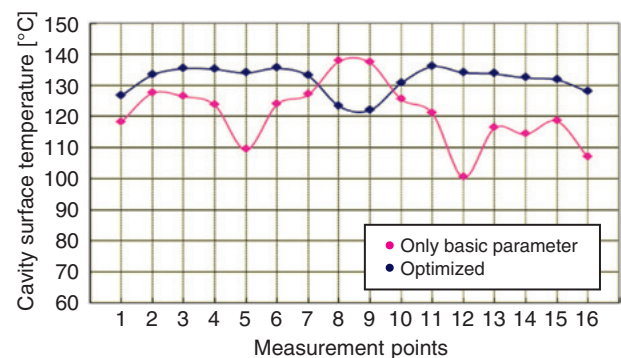


Fig. 11 Temperature distribution of cavity surface of mold for rear grab rail by optimized channel design compared with that by basic parameter channel design

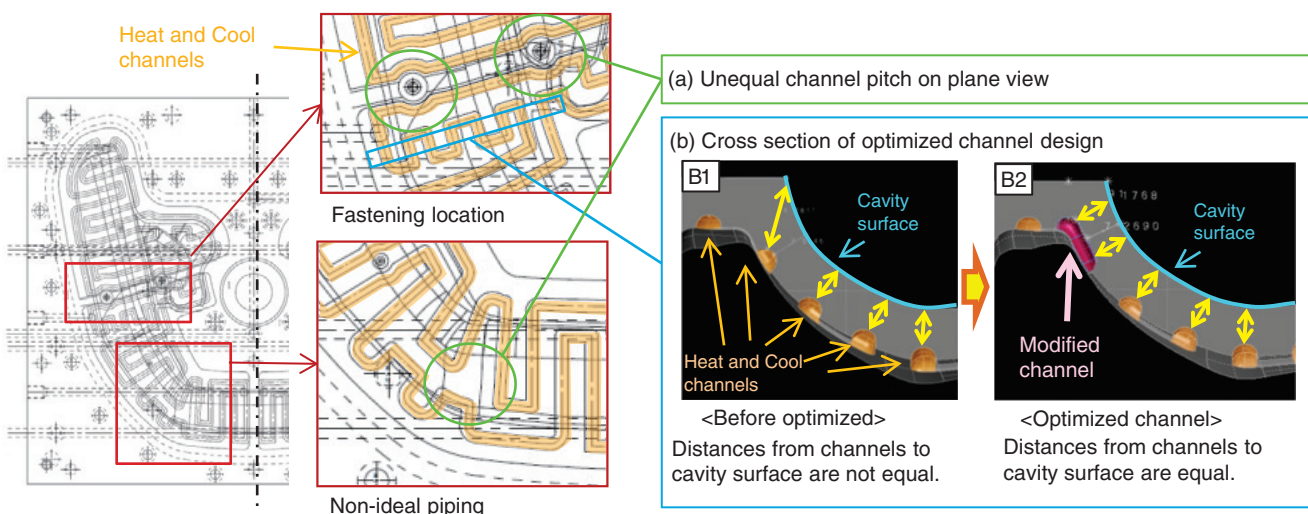


Fig. 12 Examples of non-ideal piping and cross section of optimized channel design of Heat and Cool channels

めの締結構造やその製品形状のために、平面図上でも同じピッチで温調配管を配置することができない。さらに Fig. 12 (b) に示す断面図の箇所では、平面図上では温調配管は設定されたパラメータにしたがって等ピッチで配置されているように見えるが、実際にはキャビティから遠い箇所ができてしまい、求められる温度分布が得られない。そこで、Fig. 12 (b) の図中の B2 に示すように配管の幅を広げて、この部分の温度上昇を助ける配管形状とする必要がある。

このように、実際の金型設計では、特別な温調配管構造を適用しなければならない箇所が生じる。そして、配管修正を適用した場合に、ねらいとする温度分布がすべての箇所で見られるかどうかを、型製作前に評価する必要がある。この評価を実現する手法としてキャビティ温度分布を推定できるシミュレーション手法の検討をおこない、パラメータ設定による配管設計を補うツールとすることを目指した。

5.2. シミュレーション手法

温度分布のシミュレーションは、部品開発における使いやすさを考慮し、樹脂成形の流動解析ソフトである東レエンジニアリング株式会社製の 3D TIMON[®] を用いた。温調回路内での熱伝達は、Gnielinski の式 (1) を用いてヌセルト数 Nu を求めて計算をおこなった⁽⁴⁾。

$$Nu = \frac{F_2 (Re - 1.0 \times 10^3) Pr}{1 + \frac{12.7(Pr^{2/3} - 1.0)}{1.414213562 \times F_1}} \quad (1)$$

$$F_1 = 3.64 \log_{10} Re - 3.28$$

$$F_2 = \frac{1}{2F_1^2}$$

$$Re = \frac{D \cdot u}{\nu} \quad Pr = \frac{\eta \cdot c_p}{k}$$

Nu : Nusselt number	Re : Reynolds number
Pr : Prandtl number	D : Diameter
η : Viscosity	u : Flow velocity
k : Thermal conductivity	ν : Kinematic viscosity
c_p : Specific heat	

H&C 成形法の熱媒体として用いられる蒸気は、ボイラから発生する飽和蒸気であり、液相の水と気相の水 (水蒸気) が共存している状態と考えられる。そのため加熱工程の開始時においては、前サイクルの水が残った冷えた温調回路内に、約 180°C の飽和蒸気がボイラから供給されるため、蒸気は温調回路内で急速に冷やされ、液相の水として回路内を流れると考えられる (Fig. 13)。

その後、さらに蒸気を供給し続けると温調回路内が蒸気に置換されるが、温調回路壁面は供給される飽和蒸気よりも温度が低いため、温調回路内で凝固して液相の水となる。よって、温調回路内が蒸気に置換された後も、蒸気と液相の水が共存し、蒸気からの熱伝達は液相の水を介しておこなわれる。

以上の考察により、熱の受渡しに主体的に寄与しているのは蒸気ではなく水であると考えた。そこで、加熱媒体を蒸気と同温の 180°C の熱水と仮定したモデル化をおこなった。

5.3. テストピースでのシミュレーション結果

シミュレーション手法の妥当性検証は、金型を模擬したテストピースの表面温度の変化について、実測結果とシミュレーション結果を比較することによっておこなった。実測結果と比較するため、Fig. 5 のテストピースをモデル化し、シミュレーションをおこなった。実際の H&C 成形プロセスと同様に温調回路に蒸気を流して加熱し、テスト

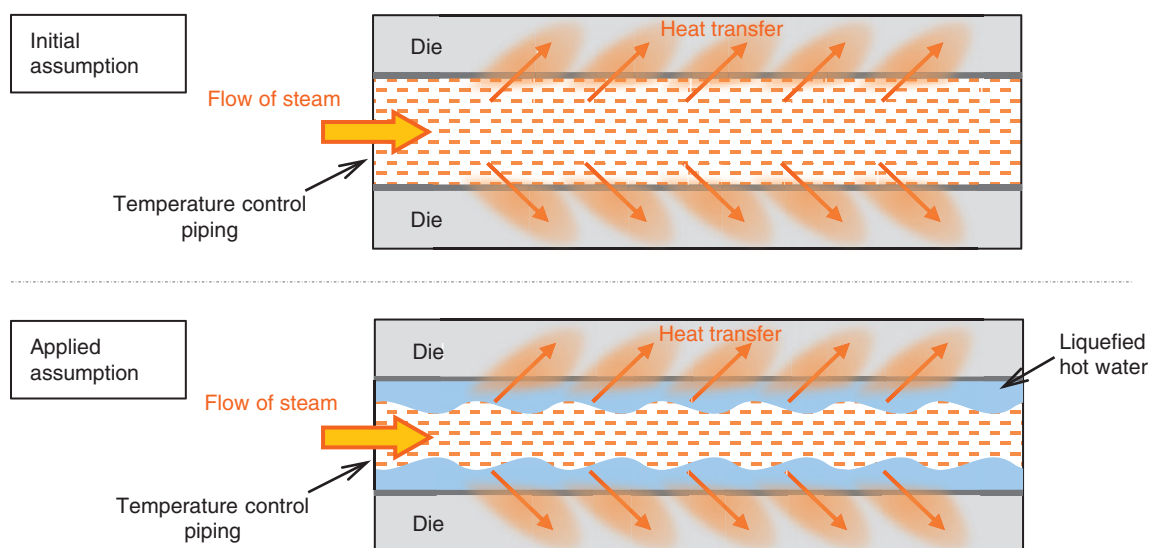


Fig. 13 Consideration on behaviors of heat medium in temperature control piping

ピース表面を金型キャビティ表面とみなして温度変化を測定した。また、温調回路は径 D 、深さ H 、ピッチ P 、長さ L の四つのパラメータで仕様が決定されるため、各パラメータを変量したテストピースを作製した。実測とシミュレーションの相関性は、昇温に要する時間とキャビティ表面の温度分布に対して、各パラメータがどのように影響するかを比較することで検証した。

深さ H に対する表面温度が 120°C になるまでの加熱時間を、熱媒体を熱水と仮定したシミュレーションにより求めた結果を Fig. 14 に示す。配管深さが 15 mm を超える領域では実測とシミュレーションの昇温時間の差異が大きくなるものの、 $H\&C$ 成形法で多用する 15 mm 以下の領域では、実測された時間を良く再現している。一方で、蒸気を加熱媒体としておこなったシミュレーションでは金型に伝達される熱量が小さく、加熱に要する時間が長くなってしまい、実測値を再現していないことがわかる。また、前述の Fig. 10 で示した、深さとピッチの比 (H/P) に対する、 120°C に到達した時点での表面温度差の実測値に対し、シミュレーションを比較した結果を Fig. 15 に示す。 H/P に

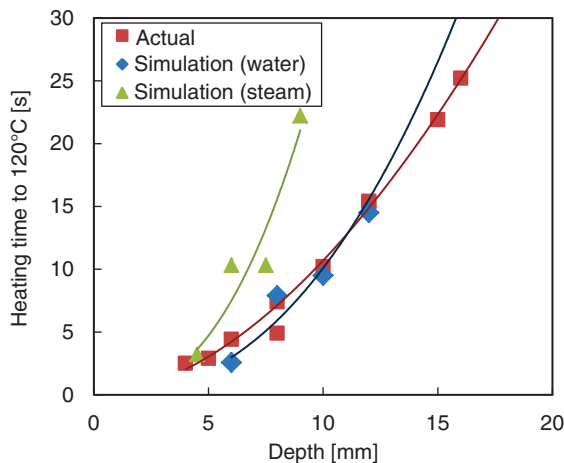


Fig. 14 Heating times to raise temperature from 40 to 120°C compared with different simulation methods

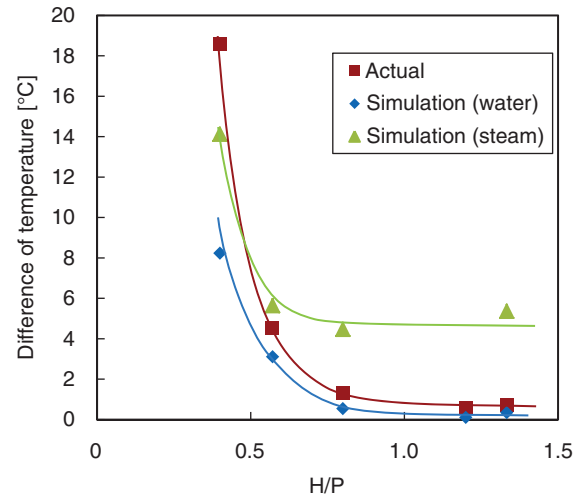


Fig. 15 Variation in deviations of cavity temperature in reference to ratio between H and P (H/P) compared with different simulation methods

対しても、実際に使用する可能性の高い H/P が 0.5 から 1.0 の範囲ではシミュレーションと実測の温度差は 2°C 以下であり、温度差の検証をおこなうには十分な精度を持っていると考えられる。これらの結果より、熱媒体を熱水と仮定したシミュレーションは、実測に対し十分に強い相関を持った結果が得られており、簡易解析用として実用的に使用可能と判断された。

6. 金型キャビティ温度予測手法のリヤグラブルールへの適用

6.1. リヤグラブルール金型の概要

テストピース実測に基づいて決定した配管仕様に従い、リヤグラブ規則の $H\&C$ 成形用金型の温調回路を設定した金型構造と温調回路を Fig. 16, 17 に示す。温調回路は分割した金型のあわせ面に形成され、可動側、固定側ともに4回路ずつ設定した。

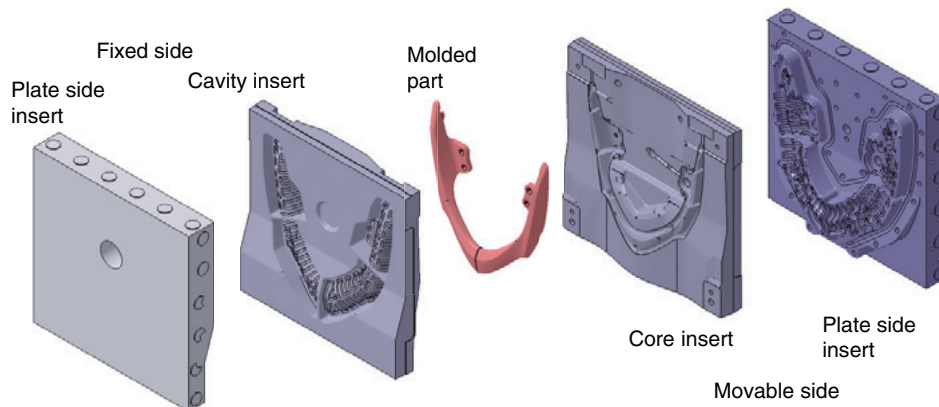


Fig. 16 Overview of mold parts fabricated by Milled Groove Channel method

6.2. 検証

Fig. 18 はリヤグラブレール用の金型のキャビティを示しており、各点は温度の測定点を示す。各測定点について、キャビティ表面温度が全域で 120°C を超えたときの温度を、Fig. 19 に示す。図からわかるように、各測定における

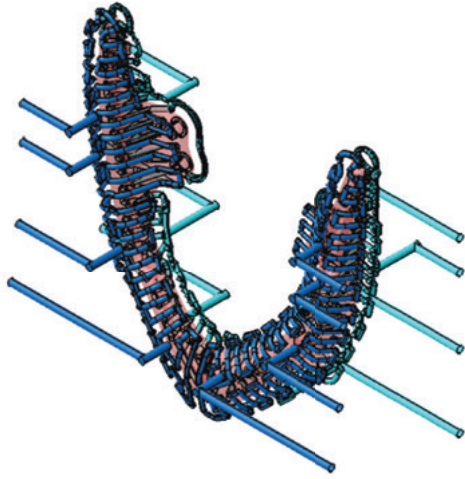


Fig. 17 Thermal control piping arrangement of Heat and Cool molding for rear grab rail mold, whose design is based on investigated specifications

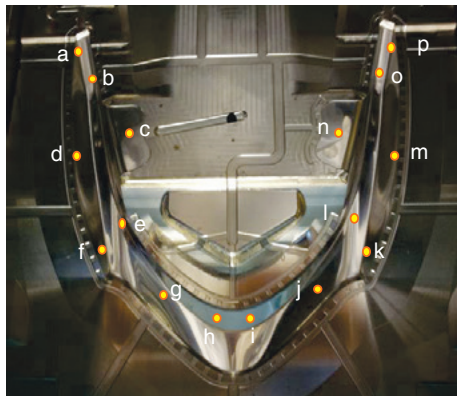


Fig. 18 Measurement points on cavity surface of mold for rear grab rail

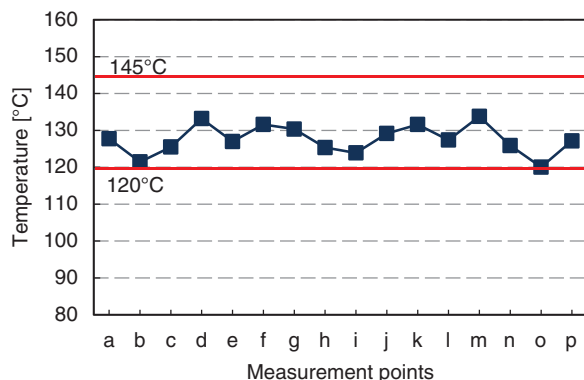


Fig. 19 Temperature distribution of cavity surface of mold for rear grab rail

温度は、目標とする温度範囲である 120°C から 145°C の範囲に入っていることが確認できた。

また、Fig. 20 に示すように、成形サイクルは目標とした 120 秒以下である 100 秒を達成することができた。

得られた成型品の外観を Fig. 21 示す。金型温度 40°C の通常の射出成型品の外観にはガラス繊維の露出が見られるが、H&C 成形法の成型品にはガラス繊維露出がないことが確認された。

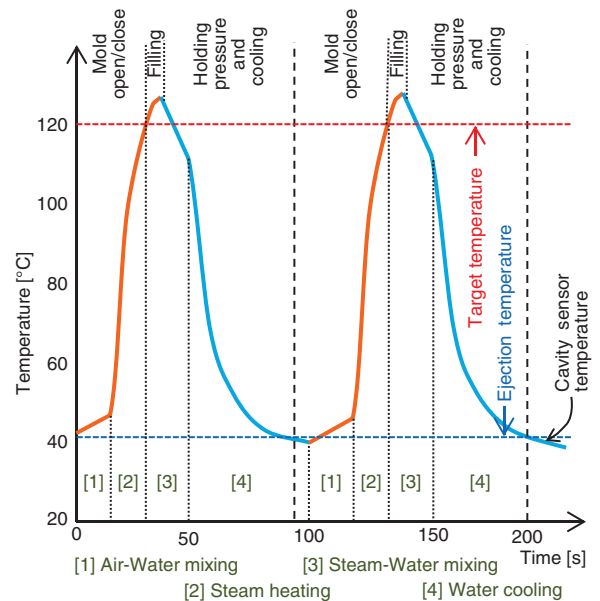


Fig. 20 Cavity temperature changes and molding cycle in actual molding processes using developed molds

Conventional injection molding	Heat and Cool molding
	
Gloss: 8-12	Gloss: 72-73

○ Gloss measurement area

Fig. 21 Exterior appearances and measured gloss value of part molded by Heat and Cool method compared with part molded by conventional method

6.3. シミュレーションと実測の比較

熱媒体を熱水と仮定した金型加熱時のキャビティ温度分布のシミュレーションを、Fig. 16 に示すリヤグラブレール金型の 3D モデルを用いておこなった。実測とシミュレーション結果の温度分布の比較は、全測定箇所が 120℃ 以上となったときの値を用いておこなった。シミュレーションで得られた温度分布表示上に、実測とシミュレーションの比較に用いた点を示した図を Fig. 22 に示す。また、各点での温度比較結果を Fig. 23 に示す。このグラフからわかるように、シミュレーション結果は、実測結果の温度分布の傾向をよく再現している。

測定箇所全体を見たときに、温度の高低分布幅について

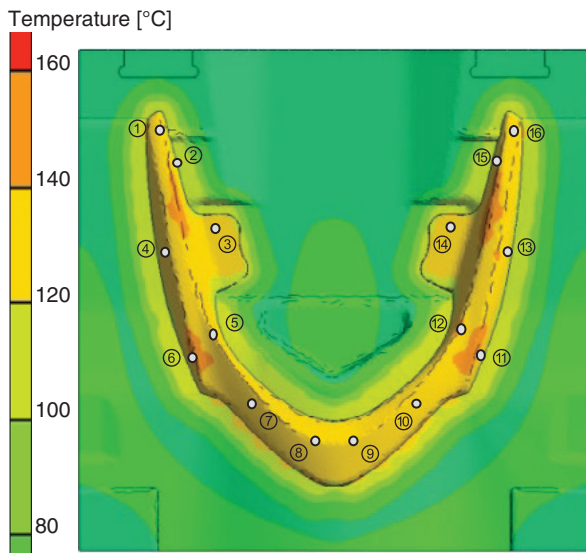


Fig. 22 Measurement points of cavity surface temperature of rear grab rail mold

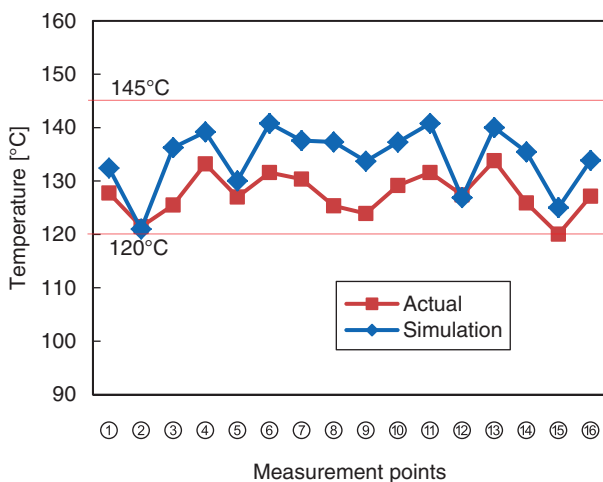


Fig. 23 Temperature distribution of cavity surface of rear grab rail mold

は、シミュレーションにおける温度幅 20℃ に対して、実測においては 15℃ とやや狭い。また、これとは別に、120℃ までの加熱時間を比較した結果において、実測では 23 秒であるのに対し、シミュレーションでは 10 秒と差異が生じていた。

これらの違いは、供給される熱量の違いによるものと推定する。シミュレーションにおいては、各温調回路に 180℃ の熱水が一定の流量で供給されているという理想的な条件で計算されている。一方、実測においてはボイラの能力の制限により、この理想的な条件よりも低い温度と流量で熱量が供給されていると推定される。金型が大きくなると、さらにボイラの能力が不足していき、シミュレーションでの理想的な条件からずれていってしまうと考えられる。したがって、実測に対しシミュレーションは、加熱するのに時間がかからず、また、熱拡散が生じる時間が短いと各部の温度差が大きくなる傾向を示すと考える。よって、金型の大きさに対し十分なボイラの能力が確保できていない場合、シミュレーションは加熱時間の予測には有用でないが、キャビティ表面温度分布の可否判断に対しては、実際の条件よりも評価を厳しくする方向に働くため有用と判断する。

7. 量産機種への適用

以上の検討結果により開発した製法を適用し、タイ生産の量産機種のリヤグラブレールを生産した。量産用金型を Fig. 24 に示す。また、適用した機種と部品の外観を Fig. 25 に示す。今回開発した金型は量産において 40 万ショット以上の生産実績を達成し、現在も更新型にて生産が継続中である。

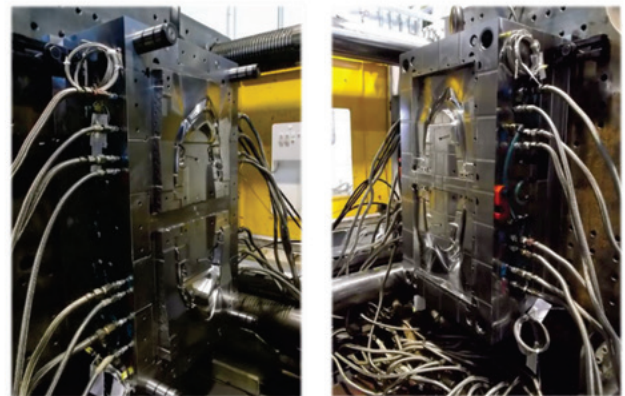


Fig. 24 Grab rail mold of Heat and Cool molding for mass production



Fig. 25 Mass production rear grab rail of Heat and Cool molding applied to Thai model

8. 結論

PP-GF の H&C 成形に用いる金型のキャビティ表面温度の予測技術として、テストピース実測結果を用いる手法とシミュレーションによる手法を構築した。その際、シミュレーションでは、ボイラの飽和蒸気を熱媒体として用いるシステムに対し、熱媒体を熱水と仮定する簡易的手法が有用であることを示した。

テストピースでの実測結果を用いる手法により、キャビティ表面温度を均一に速く加熱する金型温度調回路の基本設計が可能となった。

構築したシミュレーションは加熱時間の予測には有用でないが、キャビティ表面温度分布の可否判断に対しては、実際の条件よりも評価を厳しくする方向に働くため有用である。これにより、配管配置の制約でテストピース実測による手法を適用できない箇所に対しても、シミュレーションでキャビティ表面温度分布を予測・評価することができるようになり、金型温度調回路の設計が可能となった。

参考文献

- (1) Sugio, D., Okazaki, S., Kaneko, M.: Application of Rapid Heat and Cool Molding to High Strength Outer Parts without Painting Treatment, SAE International

Journal of Materials and Manufacturing, Vol. 10, No. 1, DOI 10.4271/2016-32-0024, (2017)

- (2) 杉生大輔, 岡崎信平, 金子光雄: 二輪車用樹脂部品のヒート & クール成形用金型設計評価のためのシミュレーション手法の検討, 自動車技術会 2017 年春季大会学術講演会 講演予稿集, No. 111-17, p. 2857-2862, (2017)
- (3) Shayfull, Z., Sharif, S., Zain, A. M., Ghazali, M. F., Saad, R. M.: Potential of Conformal Cooling Channels in Rapid Heat Cycle Molding: A Review, Advances in Polymer Technology, Vol. 33, No. 1, DOI 10.1002/adv.21381, (2014)
- (4) Gnielinski, V.: New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow, International Chemical Engineering, Vol. 16, No. 2, p. 359-367, (1976)

■ 著 者 ■



杉生大輔