

金属光造形複合加工金型による射出成形の高精度化*

米山 猛** 香川博之** 阿部 諭*** 末廣栄覚†

Accuracy Improvement in Injection Molding Using Milling-Combined Laser Metal Sintered Mold

Takeshi YONEYAMA, Hiroyuki KAGAWA, Satoshi ABE and Yoshiaki SUEHIRO

Effective cooling channels have been installed in the injection mold during the process of milling-combined laser metal sintering. In the case of molding a flat piece with multiple ribs, it is difficult to insert cooling channels between the ribs by conventional machining. Because the heat remains between the ribs, the piece shrinks after the molding to form a warp on the flat surface. Using milling-combined laser metal sintering, oval holes were fabricated between the ribs and they were connected in a spiral loop. The temperature around the ribs became uniform and the warp on the flat surface of the molded specimen reduced compared with that molded in the mold made by conventional method using milling and electro-discharge machining. Simulation of the mold temperature and the warp by commercial software showed the same tendency on the change of the warp with the mold type and the cooling temperature conditions. Therefore, the accuracy of the molded specimen is improved by inserting cooling channels in the mold where heat accumulates using a milling-combined laser metal sintering and the effect can be evaluated by a simulation.

Key words: laser metal sintering, injection molding, cooling channel, accuracy, simulation

1. 緒 言

レーザを用いて金属粉末を焼結させながら積層する方法は、内部に任意の水路を配置した金型の作成が容易で、射出成形の冷却促進や精度向上が期待できる^{1)~5)}。レーザで焼結積層するだけでは、焼結体の表面粗さや寸法精度が悪く、後加工に表面切削が必要であったが、阿部らは、図1のようにレーザによる金属粉末の焼結積層造形法に切削加工を複合化して、なめらかな仕上げ表面と高い寸法精度を持つ造形物をワンプロセスで実現する方法を開発し、金属光造形複合加工法と名付けている⁶⁾。この方法によれば、深いリブ溝を持つ金型でも、溝内面を切削で仕上げながら造形することができ、さらにリブの間に冷却水路を内蔵することができる。

そこで、本研究では、リブを持つ成形品を対象とし、リブ間に冷却水路を配置することで、射出成形における金型温度を均一化し、成形品のそりを低減して高精度化を図ることを目的とする。この目的のため、リブ付き成形品の金型として、冷却水路を内蔵した金型を金属光造形複合加工法で作成する。一方同じ成形品を作る金型を、従来の製法である鋼材から切削および放電加工による方法で製作し、両方で射出成形を行って金型温度や射出成形品のそり量を比較する。この研究を通じて金属光造形複合加工法を用いた金型作成における冷却水路配置に関する知見を積み上げる。また冷却水路を配置した金型の設計における射出成形解析ソフト活用の有用性についても検討する。

2. 成 形 対 象

本研究で対称とした成形品モデルを図2に示す。縦60mm横40mmの平板の片側に五つのリブを有する成形品で、リブから

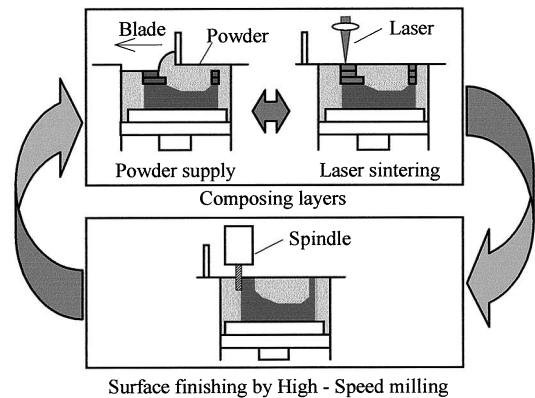


Fig.1 Milling-combined laser metal sintering process

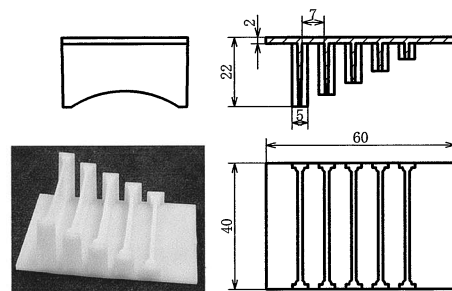


Fig.2 Flat plate with ribs as an evaluation sample

の熱流出が大きいと、金型コア内リブ部の温度が上昇し、結果的に成形品リブ側の冷却が遅れるため、リブ部の温度が高いまま成形品が金型から取り出され、その後の熱収縮によってリブ側が反対側よりも縮んで、平面に凸形のそりが発生すると予想される。そりに対するリブ長さの影響を見るため、ゲートから遠ざかる

* 原稿受付 平成19年3月7日

** 正 会 員 金沢大学 (金沢市角間町)

*** 正 会 員 松下電工株式会社 (大阪府門真市大字門真 1048)

† 学生会員 金沢大学大学院 (現, 日本ガイシ株式会社)

につれてリブの長さを徐々に長くしてある。またリブの端部は凹形で、リブの両側にも縦方向に短いリブをつけてある。これは、従来の金型製法において、ワイヤカットによる加工が適用できず、型彫り放電加工を必要とする成形品形状としたためである。鋼材から切削および放電加工を用いてこの成形品の金型を作るためには、放電加工の電極の作成など、多数の加工工程を必要とする。一方金属光造形複合加工法によれば、ワンプロセスでリブ溝を有する金型コアを造形することができるので、金型製作時間の短縮を図ることができる。

3. 金型設計と造形

リブ間の金型厚さは7mmであり、ここに水路を配置することにより、リブ部を効果的に冷却できると考えられる。一方造形物の強度を確保するため、水路の壁面と金型表面との間は2mmないし3mm程度の肉厚を確保したい。また水路を造形する際、水平方向水路穴の上側の造形は水路内の未焼結粉末の上に焼結層を側面から積み上げていくため、積み上げの角度（垂直方向に対する角度）をあまり大きくしたくない。これらを考慮して、リブの間に設ける水路の横幅を3mmとし、水路の断面積を確保するために縦幅を5mmの楕円断面水路とする。リブ間の水路どうしは、らせん状に接続する。つまり一つのリブ間の金型壁面に沿ってコの字形に水路を配置した後、次のリブ間の水路に斜め方向の水路でつなげる。このような水路を配置できるのが、金属光造形法の特徴である。配置した水路を図3に示す。長手方向のリブの外側にも水路を配置した。キャビティ側には、リブの位置に水路の位置を合わすように直径4mmの円形の水路をジグザグに配置した。なお、この金型においてゲートに近い水路がコアにおいてもキャビティにおいても別回路にできるようにしているが、これは最初の造形では、入れていなかったところに、より均一な金型温度を実現するために2回目の金型造形において追加したものである。

金型をベースプレート(鋼板)上に、リブ内面など金型表面を切削仕上げしながら造形した。ただし、水路壁面については、造

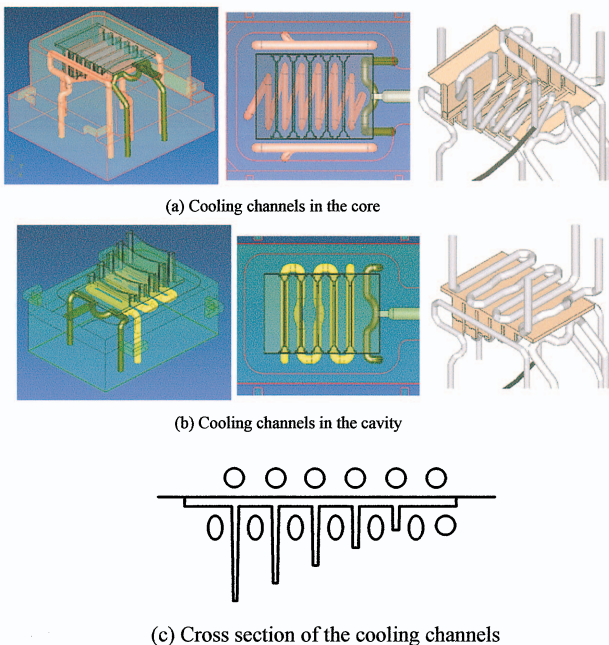
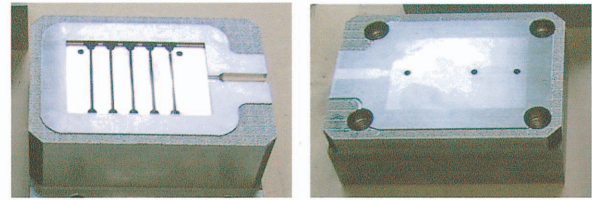
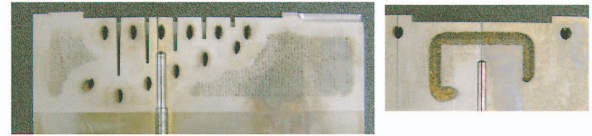


Fig.3 Design of cooling channels in the laser metal sintered mold

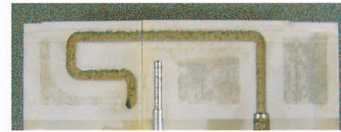


(a) Core (b) Cavity

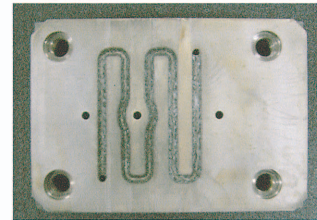
Fig.4 Laser metal sintered core and cavity



(a) Longitudinal cross section of the ribs (b) Transverse cross section between the ribs



(c) Longitudinal cross section outside the ribs



(d) Cross section of the channels in the cavity

Fig.5 Cross section of the cooling channels in the sintered mold

造形時間を短縮するため、切削をかけないで造形した。造形した金型の外観を図4に示す。コア表面の二つの穴は金型表面近くまで熱電対を挿入したピンを入れて、金型温度を検出するための穴である。キャビティ表面にも3箇所温度検出ピン用の穴を設けた。金型の縦断面および横断面を図5に示す。ただしこの金型はゲートに近い水路がない金型の断面である。金型の縦断面を見ると、楕円形の水路がきれいに造形されていることがわかる。中央の垂直な穴は温度センサを挿入した穴である。横断面からは、リブ内壁面に沿ってコの字形に水路が造形されていることが確認できる。金型縦断面において、表面から離れた内部の多孔質状の部分は、レーザーの焼結密度が粗いコア層である。

一方、光造形複合加工金型と比較するため、鋼材から切削と放電加工によって製作する金型(これを鋼材金型と呼ぶ)の構造を図6に示す。水路は、ドリル加工によって通常設けると想定されるものを製作した。キャビティ側には平板と平行にドリル穴を設け、それらを接続した。コア側には、リブ外の両側に水路を配置するとともに、リブ部の下部に斜め方向に直線的な直径6mmの水路を配置した。

4. 射出成形条件

成形樹脂には、結晶性で冷却時の体積収縮によりその発生しやすいPOM (Polylastics 製ジュラコン M90S) を用いた。射出樹脂温度を190℃にし、射出圧113MPa、保圧100MPa、保圧時間3s、冷却時間14sで成形を行った。コア内の水路を全て連結して、コア側冷却水を通し、キャビティ内の水路も連結

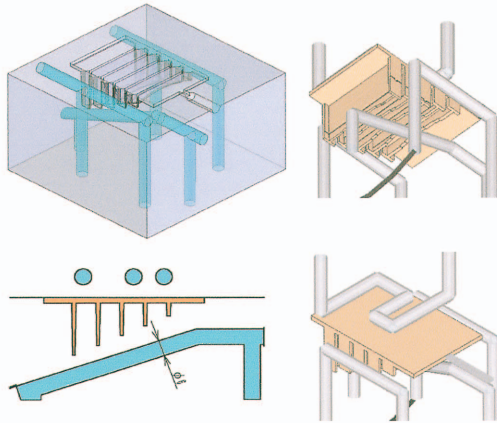


Fig. 6 Cooling channels in the steel mold

して、キャビティ側冷却水を流した。コア側冷却水の温度を 40℃ または 60℃ とし、金属光造形金型の場合は、キャビティ冷却水温度をコア水温と同じか±5℃、鋼材金型の場合はコア水温と同じか+10℃、+20℃、+30℃とした。冷却水流量は、コア側 1.1L/min、キャビティ側 2.5L/min であった。

5. 金型温度と成形圧力

5.1 金型温度

金型温度を比較するために、図 7 に示すように温度センサを配置した。金型表面温度を測るために、直径 3mm のピンの側面に表面から 0.5mm の位置まで溝を掘り、直径 0.5mm のシース熱電対を挿入した。これによって金型表面から 1mm 程度の深さ位置の温度を検出すると考えられる。このような表面温度センサをコア表面に 2 箇所、キャビティ表面に 3 箇所配置した。またコアのリップ部の内部と外部には深さ 15mm の位置に温度センサを挿入した。

コア水温、キャビティ水温ともに 40℃ の場合の、射出成形中の 1 サイクルにおける金型温度の変化を、金属光造形複合加工金型と鋼材金型について比較して図 8 に示す。まずコアの表面温度であるコア 1、コア 2 とキャビティ面の表面温度であるキャビティ 1、2、3 を比較すると、金属光造形金型においても、鋼材金型においても、コア側表面温度の上昇はキャビティ表面温度の上昇よりも大きいことがわかる。このことは、リップのあるコア側における放出熱量が多いからであると考えられる。それらの温度上昇量は金属光造形金型の方が鋼材金型よりも大きい。これは、金属光造形金型材の熱伝導率(約 10W/mK)が鋼材金型の熱伝導率(約 30 W/mK)よりも小さく、短時間の間には金型表面に熱がたまりやすいことを示している。しかし、リップ間に配置した冷却水路の効果により、型開きおよび型閉め時の温度は冷却水温(40℃)とほぼ同じ温度まで下がっている。これに対して鋼材金型のコア表面の温度は冷却水温よりも高くなっており(43℃)、冷却が不十分であることがわかる。さらにコア中央内部の温度であるコア 4 の温度を金属光造形金型と鋼材金型とで比較すると、金属光造形金型では、ほぼ冷却水温に近い温度が保たれているのに対し、鋼材金型では、51℃から 56℃の間を上下動しており、コア中央内部が高い温度になっており、十分な冷却ができていないことがわかる。

5.2 成形圧力

成形中の圧力を比較するために、図 9 に示すように、各リップ両端 10 箇所のエジェクタピンに圧力センサ(双葉電子製 EP

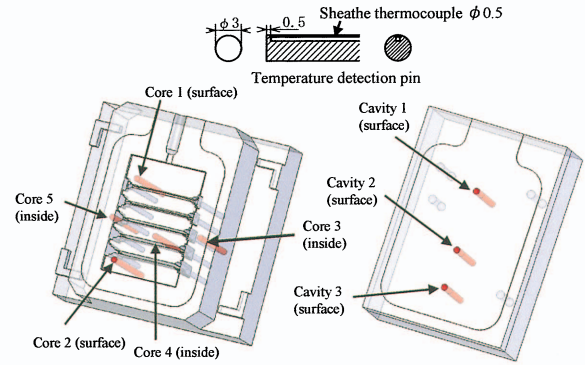
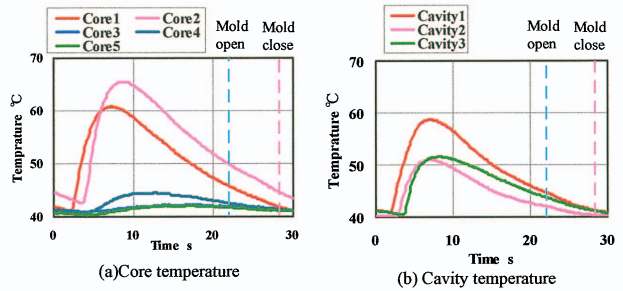
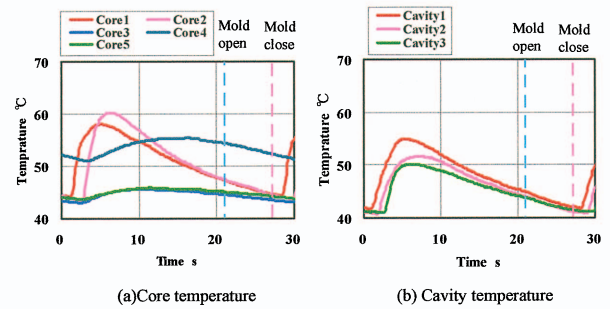


Fig. 7 Measuring points of temperature



(1) Temperature change in the sintered mold



(2) Temperature change in the steel mold

Fig. 8 Temperature change in the mold

センサ)を用いた。

コア水温、キャビティ水温ともに 40℃ の場合の射出成形 1 サイクルにおける圧力変化を図 10 に示す。保圧時に圧力センサ部にかかる圧力は 60~70MPa で、ゲートから遠い点ほど圧力が高い傾向がある。これは、ゲートから近いリップから順番に充填が進行していくので、先に充填した部分は冷却が進んで樹脂内の固化層が厚くなっていくのに対し、最後に充填するリップ先端へは、まだ固化層が薄くて、圧力がよく伝わるからではないかと考えられる。リップの両側で大きな差はなく、また金属光造形金型と鋼材金型とを比較してもほとんど差がない。したがって、成形圧力に関しては、金属光造形金型の場合も鋼材金型とほぼ同様となっている。なお水温が 60℃ の場合は最大圧力が 70~80MPa と、水温 40℃ の場合より高くなったが、やはり金型による違いは見られなかった。

6. そりの比較

成形品平板部の凹凸を 3 次元デジタル計測機(コニカミノルタ製 VIVID910)で成形品の長手方向中心線とその 10mm 両隣のラ

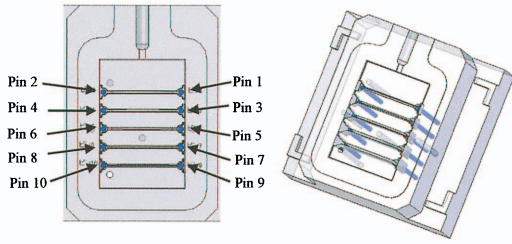


Fig.9 Measuring points of pressure

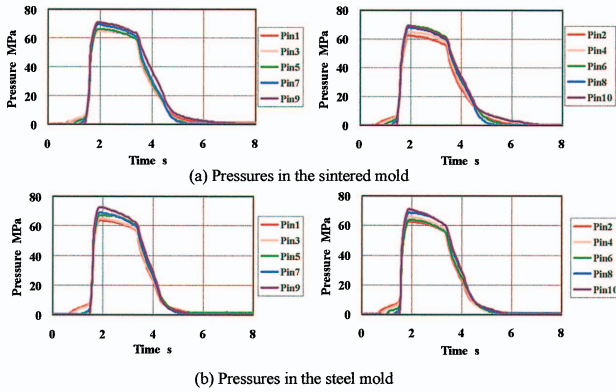


Fig.10 Pressure change during injection molding

インで計測し、そのプロフィールを求めるとともに、図 11 に示す寸法でそりを表示した。そりには凸形、凹形、および S 字形があり、長手方向の両端からそれぞれ 5mm の位置を直線で結び基準線とし、基準線からの変位を、凸の場合 +、凹の場合 - で、ゼロからその最大変位までの長さの線分で示し、S 字の場合は凹部の変位から凸部の変位までを結んだ線分で示した。

コア水温、キャビティ水温ともに 40°C の場合の長手方向中心線を計測したプロフィールと成形品の側面写真について金属光造形金型による成形品と鋼材金型による成形品の比較を図 12 に示す。金属光造形金型の場合も鋼材金型の場合もそりの形は凸形であり、長いリブのところでは屈曲していることがわかる。金属光造形金型の場合そり量は 0.1mm、鋼材金型の場合は約 0.35mm となっており、金属光造形金型による成形によって、そりが大きく低減されている。これは、金型温度の違いにも見られたように、金属光造形金型の場合、コア内リブ部が冷却水路によって冷却されており、成形品が全体に均一に冷却されているからだと考えられる。

コア水温とキャビティ水温に差をつけた場合のそり量変化の比較を図 13 に示す。コア水温 40°C に対し、キャビティ水温を変えた場合のそり量の変化を示している。金属光造形金型の場合、キャビティ温度をコア温度よりも 5°C 高くするだけで、そりは S 字形になり、0.1mm 以内のそり量になっている。S 字形となるのは、リブ部側の冷却水温を下げることによってリブ部のそりは低減するが、逆にリブのない平板部（ゲートに近い部分）に逆方向のそりを生じるからである。鋼材金型の場合には、キャビティ水温をコア水温よりも 30°C 上げて初めて S 字形のそりとなるが、そのそり量は依然として約 0.2mm と大きい。したがって、金属光造形金型を用いて冷却水路をリブ内に配置することによって、そり量を大幅に小さくでき、また冷却水温のわずかな違いで、そり量を変化させることができる。

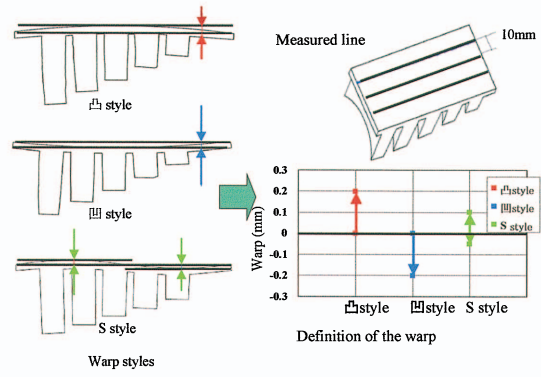


Fig.11 Evaluation of the warp on the molded specimen

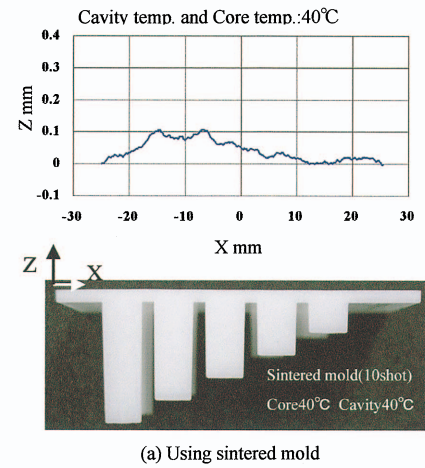


Fig.12 Comparison of the warp between sintered mold and steel mold

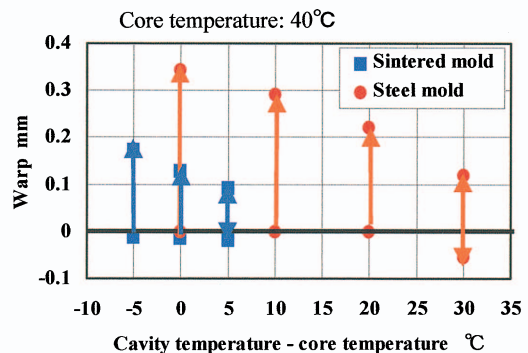


Fig.13 Change of the warp with the temperature difference

7. 射出成形解析

金属光造形複合加工法によってコア内部に冷却水路を配置し、成形品のそりを低減することができることがわかったが、水路配置設計をしたとき、それによってそりがどの程度低減するか、設計段階で評価することが求められる。そこで、射出成形シミュレーションによるそり解析と実験結果とを比較し、シミュレーションによる予測が冷却水路設計に役立つことを見出す。

射出成形シミュレーションソフト TIMON (東レ) を用いて、その解析を行った。ただしソフトにおいては、金属光造形金型における冷却水路の断面形状をそのまま与えることができないため、同じ流路で直径 3mm の円管水路として解析を行った。鋼材金型に対しては同じ円管水路を与えて解析した。

コア水温、キャビティ水温ともに 40°C の場合の、金型表面温度の解析結果を図 14 に示す。金属光造形金型においては、リップ部の温度が均一化されているのに対し、鋼材金型においては、リップ中央部の温度が高いことが解析結果にも現れており、金型温度の測定結果と一致している。

コア水温とキャビティ水温に差をつけたときのそり量の変化について、シミュレーションと実験結果を比較したものを図 15 に示す。キャビティ水温をコア水温よりも高くしていくことによってそりが凸形から S 字へそして凹形へ変化していく変化が実験結果と同様に解析されている。金属光造形金型に対するそり解析と鋼材金型に対するそり解析を比べると、金属光造形金型におけるそりが小さいことが、解析でも表れている。解析においては、金属光造形金型の場合温度差なしで、鋼材金型のばあい温度差 10°C で S 字領域となり、実際よりもコア側が冷却された解析となっている傾向がある。このように、金型の違いによるそり量の違いや、水温差によるそり量の変化の傾向は実際とよく一致している。そり量の大きさや、そり形状の変化する位置は実際と少しずれているが、水路配置にともなうそり低減効果をシミュレーションであらかじめ確認することが可能であると考えられる。

8. 結 言

リップ付平板成形品を取り上げ、金属光造形複合加工法によって、金型リップ溝間に楕円断面形状の冷却水路を配置し、金型リップ部の温度を均一化し、成形品のそりを低減して成形精度を向上させることを示した。射出成形シミュレーションを活用すると、水路を配置した場合の金型温度、冷却水温度を変化させた場合のそり量変化を予測することができる。金属光造形複合加工法を用いて従来の加工法では冷却しにくかったところに水路を配置することが可能であり、射出成形シミュレーションを活用した水路設計と、光造形複合加工法を用いた金型製作法により、高精度な射出成形を実現する生産プロセスとなる。

本研究は、中小企業基盤整備機構平成 15~17 年度戦略的基盤技術力強化事業「金属光造形複合加工技術の高度化による革新的金型製造法の研究開発」の委託を受けて行った。金型製作にあたっては、宮丸精密金型株式会社に、精度測定にあたっては、株式会社ネイブにお世話になった。

参 考 文 献

1) 米山猛, 香川博之, 他 6 名, 冷却水路を内蔵した粉体造形金型による射出成形の冷却促進と高精度化 (第 1 報) - 冷却構造金型の試作と基本

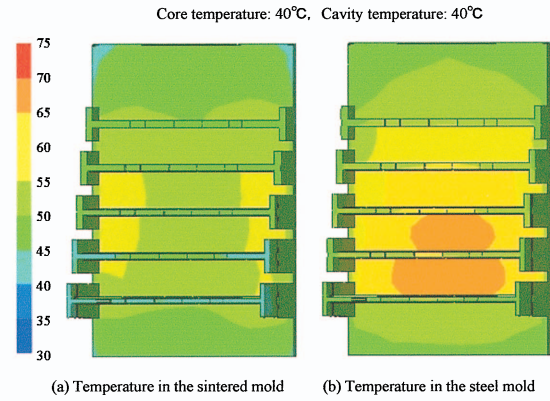
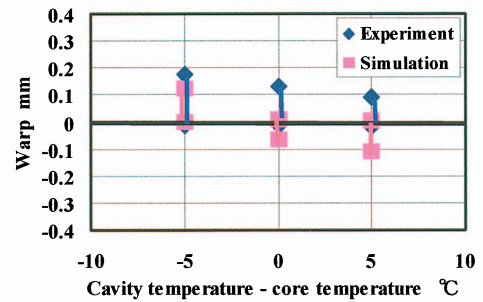
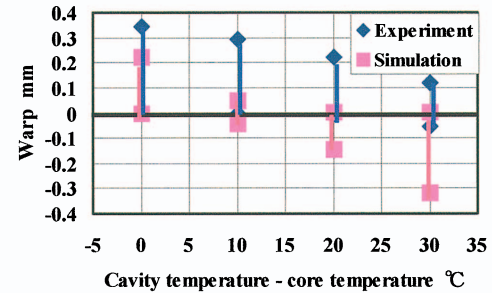


Fig.14 Temperature distribution calculated by simulation



(a) Comparison of the warp by the sintered mold



(b) Comparison of the warp by the steel mold

Fig.15 Comparison between the simulated warp and the experimental results

効果の確認一, 精密工学会誌, 67, 12(2001) 1991.

2) 香川博之, 米山猛, 他 6 名, 冷却水路を内蔵した粉体造形金型による射出成形の冷却促進と高精度化 (第 2 報) - 冷却水の温度格差の効果一, 精密工学会誌, 68,8(2002)1057.
 3) 米山猛, 香川博之, 他 5 名, 冷却水路を内蔵した粉体造形金型による射出成形の冷却促進と高精度化 (第 3 報) - スティール粉体造形金型による冷却一, 精密工学会誌, 71, 3(2005) 347.
 4) 米山猛, 香川博之, 阿部諭, 他 6 名, 金属光造形複合加工を用いた金型内冷却水路の配置と射出成形精度の向上, 型技術ワークショップ 2004 講演論文集(2004) 22.
 5) 末廣栄寛, 米山猛, 香川博之, 大原功, 阿部諭, 宮丸充, 金属光造形金型による射出成形の成形精度向上, 2005 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(2005) 585.
 6) S.Abe, Y.Higashi, I.Fuwa, N.Yoshida and T.Yoneyama, Milling-Combined Laser Metal Sintering System and Production of Injection Molds with Sophisticated Functions, 11th Int. Conf. on Precision Engineering (2006) 285.