

# 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）\*

—スチール粉体造形金型による冷却—

米山 猛\*\* 香川博之\*\* 山出洋司\*\*\*  
伊藤豊次+ 稲城正高+ 瀧野孔延++ 楊 青++

Effective Cooling and Accuracy Improvement in Injection Molding Using a Metal Mold  
with Cooling Channels Composed by Laser Sintering (3rd Report)  
- Cooling by the Steel Powder Mold with Cooling Channels -

Takeshi YONEYAMA, Hiroyuki KAGAWA, Youji YAMADE,  
Toyotsugu ITO, Masataka INAGI, Yorinobu TAKINO and Chin YAN

An injection mold with inside cooling water channels which are difficult to be made by conventional machining method has been fabricated by using selective laser sintering of steel powders. A box shape work piece has been applied as a test structure. By the cooling inside the corner of the core, the temperature difference in the core surface is reduced and then the dimension accuracy of the work piece is improved compared with the work piece injected in the conventional machined mold with outside cooling channels. The core surface temperature is directly controlled by the cooling water temperature and kept constant at the end of each shot. When the water temperature of the inside channel in the core is assigned properly lower than that of outside channel in the cavity, the warp of the periphery of the box became minimum. Although the heat conductivity of the sintered material is lower than that of mold steel, cooling effect and accuracy improvement are promoted by the combination of cooling channels near the mold surface and adequate cooling temperatures.

**Key words:** injection molding, cooling, temperature, accuracy, selective laser sintering

## 1. 精 言

近年、ラピッドプロトタイピングの手法の一つとして金属粉体にレーザを照射して焼結させ、これを積層して立体物を造形する加工法が発展し、金型の生産にも利用されるようになってきた<sup>1)~3)</sup>。この方法を用いれば任意経路の冷却水路を内部にもつ射出成形金型の製作が可能である。既報<sup>4)~6)</sup>では、このレーザ焼結造形法によりニッケル・ブロンズ粉体から冷却水路を内蔵する金型を試作し、実際に射出成形実験を行って、金型コア内に水路を設けて冷却することで、金型温度が均一化し、成形品のソリも改善されることを示した。またコア側の冷却水とキャビティ側の冷却水の温度を変えた時の効果についても調べた。しかしニッケル・ブロンズ粉体によって造形された金型は強度が低く、エポキシ樹脂を含浸して漏水を防ぐために熱伝導率も低くなるなどの問題があった。また既報での比較は、同じニッケル・ブロンズ粉体による焼結金型でコア内に水路を通したものと通さないものとの比較であり、通常金型材料で切削加工により製作した金型との比較は行っていない。近年通常金型材に近い強度を持つスチール粉体（鉄粉末にニッケルや銅の粉末を混ぜたもの）を用いてレーザ焼結造形することが可能となっており、本報では、スチール粉体を用いて冷却水路を内部に持つ金型を造形し、これによる射出成形と、一般金型鋼材から切削によって製作される金型による射出成形との比較を行う。これによって、レーザ焼結法によって冷却水路を内蔵した金型が、通常金型と比べて冷却効果があり、成形品の形状精度が改善されることを確認することを目的とする。

## 2. 金型の製作

### 2.1 金型の構造

対象とした成形品は、図1のように外形寸法で縦100mm、

\* 原稿受付 平成16年7月16日  
\*\* 正会員 金沢大学工学部（金沢市小立野2丁目40番20号）  
\*\*\* 金沢大学大学院  
+ 正会員 コニカミノルタビジネステクノロジーズ（株）（東京都八王子市石川町2970）  
++ （株）松井製作所（大阪府枚方市招堤田近2-19）

横60mm、高さ30mm、底面の肉厚1.5mm、側面の肉厚1.5mmの箱形状とした。成形品コーナ部内側に水路を配置する効果についての考えを図2に示す。成形品のコーナ部内側には(a)のように樹脂からの熱が集合し、金型温度が上昇して樹脂内部のコア側に高い温度領域が残存して、成形品を金型から取り出した後に樹脂内のコーナ部内側部分の熱収縮が外側より大きく、成形品の側壁部分が内側へ変形すると考えられる。コアのコー

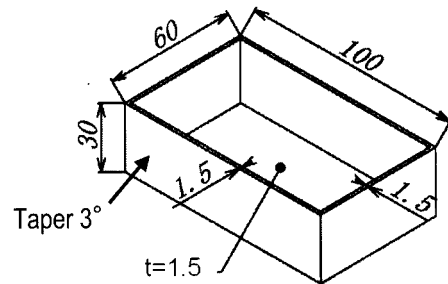


Fig.1 Shape of the work piece

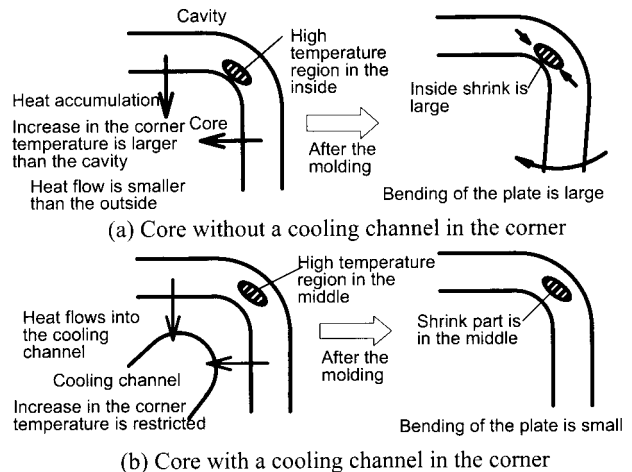


Fig.2 Effect of the cooling channel in the corner of the core

ナ部に水路を配置することで、(b)のように、集中する熱を吸収し、金型温度の上昇を抑えて、コーナ部内側の樹脂の冷却を促進し、樹脂内に残留する高温領域を樹脂肉厚の中央部に寄せることで、離型後の熱収縮を均等化して、その発生を抑えることができると考えられる。

このような考えに基づき、コーナ部に水路を内蔵する金型コアと、コーナ部から離れた箇所水路を持つ金型キャビティのセットを、スティール粉体によりレーザ焼結して造形した。造形に用いた機械は、EOS社製のスティール用の造形機である。この金型セットを「焼結金型」と呼ぶ。コアの水路構造を図3、キャビティの水路構造を図4に示す。コアにおいては、成形品コーナ部に接する上面の4辺周囲に沿って、上面に対して45°方向に長円形の水路を配置した。ただし水路穴の断面中央には、造形した際の焼結層を支えるため縦スリットを入れた。コア中央にも長手方向に水路を配置した。一方キャビティ側には側面中央を周囲に取り巻く水路と底面下部を真直ぐに通る水路とを配置した。また長手方向のコーナ部にそって空洞穴を造形した。空洞穴は、コーナ外側への熱の逃げを制限する効果があると期待したからである。

一方、一般の金型材で製作した場合の冷却や成形品のソリと比較するため、金型鋼 NAK80 から切削加工によって同じ外形寸法の金型コアとキャビティを製作した。この金型セットを「切削金型」と呼ぶ。この金型コアでは、図5のように、通常ドリル加工によって製作可能な水路として、コア底板内に直線的な

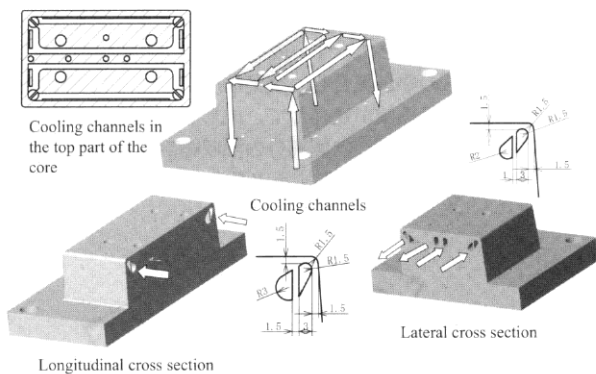


Fig.3 Cooling channels in the sintered mold core

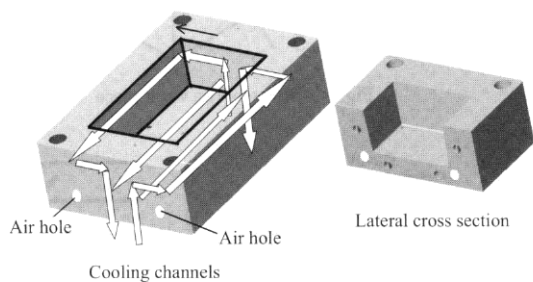


Fig.4 Cooling channels in the sintered mold cavity

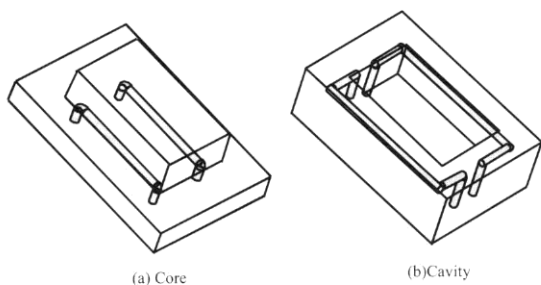


Fig.5 Cooling channels in the cut mold

水路を製作した。コア底板部に長手方向に穴をあけた後に穴の入口をふさぎ、底面から垂直に入口穴と出口穴をあけて接続した。キャビティには、成形品側面中央部を取り囲む水路を周囲からドリル加工して接続した。

コアとキャビティを組んだ際の焼結金型と切削金型の横断面冷却水路の比較を図6に示す。焼結金型では、コーナ部を中心に水路が配置されているのに対し、切削金型では、成形品の開口部を中心にした水路配置になっていることがわかる。

金型表面の温度計測箇所を図7に示す。コア A~F はコアの底面部（成形品の縁の部分）の温度、コア G~K はコア上面の温度（成形品の底面の内側）、キャビティ A~F はキャビティ底面の周囲、キャビティ H~K はキャビティ底面中央部で、コア H~K に向き合う位置の温度である。コア G に向き合うキャビティの位置にゲートがあり、コア G はゲートからの流れが最初にぶつかる箇所である。表面温度の検出には、図8に示すように、直径 0.5mm のシース熱電対を組み込んだピンを金型に挿入した。挿入したピンの側面にシース熱電対を埋め込む溝をピン先表面から深さ 0.5mm の位置まで加工して、そこにシース熱電対の先端を配置した。本論文では、このセンサで検出した温度を金型表面温度と呼ぶ。

焼結金型は最表面のメルティング層、その内側のスキン層、そして内部のコア層からなっており、それぞれレーザ照射密度と焼結密度が異なっている。造形時にそれぞれのレーザ照射条件による別試料を作成し、熱伝導率を測定したところ、メルティング層、スキン層、コア層の熱伝導率はそれぞれ 10.4W/mK, 7.8W/mK, 5.5W/mK であった。一方切削金型に使用した金型材より同様の試料を作成して熱伝導率を測定したところ 31.4W/mK であった。したがって焼結金型の熱伝導率は通常の金型材の3分の1から4分の1となっている。

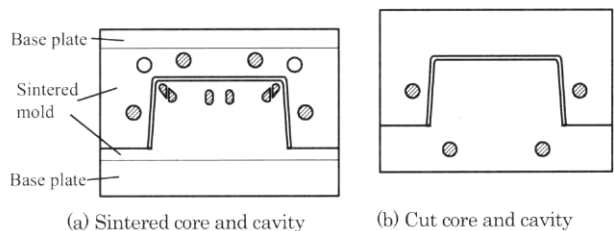


Fig.6 Cross section of the core and cavity set

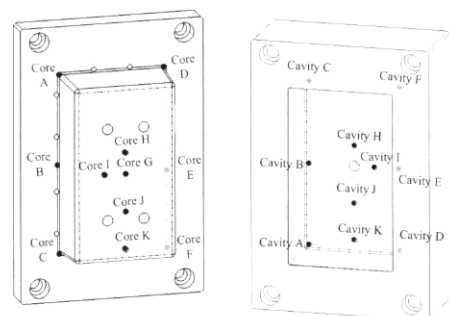


Fig.7 Positions of the temperature measurement

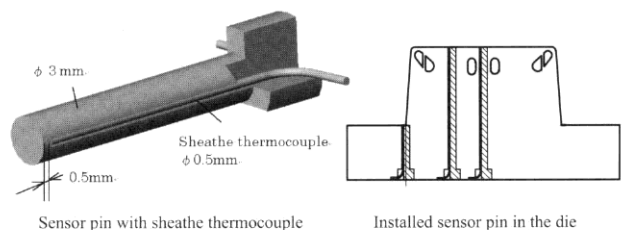


Fig.8 Attachment of the temperature sensor

### 3. 射出成形実験

成形樹脂には、結晶性の樹脂で成形時の熱収縮が大きくソリの発生しやすいPOMを用いた。成形は、シリンダ温度190℃、射出圧86MPa、保圧74MPa、保圧時間1s、冷却時間12sとし、1ショットあたりの成形サイクルを30sとした。表1に示すようにコア側、キャビティ側それぞれの冷却水の温度を変化させて、25ショットずつ成形を行い、上述の温度センサで金型表面の温度変化を測定した。コア側とキャビティ側の温度が50℃で同一の場合を基本に、キャビティに対してコア内の温度をより効果的に下げることが期待して、コア水温をキャビティ水温より

Table 1 Temperature conditions on the cooling water

Core °C	Cavity °C	Flow rate L/min
50	50	3
40	60	3
30	70	3
60	40	3

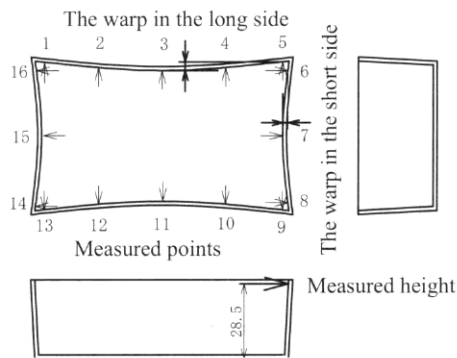
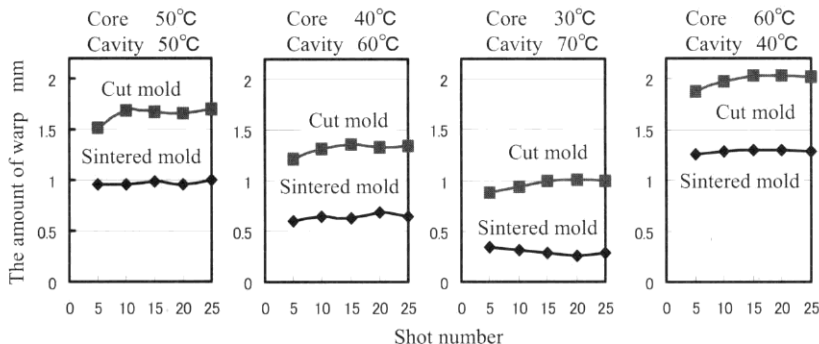
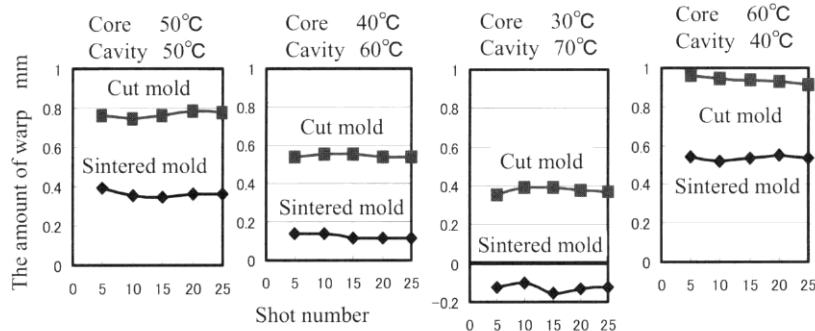


Fig.9 Measurement of the amount of warp



(a) The amount of warp in the long side



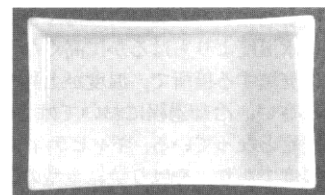
(b) The amount of warp in the short side

### 4. 実験結果

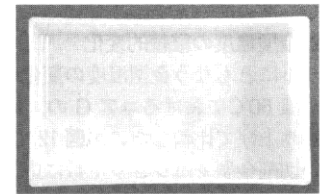
#### 4.1 成形品のソリ量

焼結金型および切削金型による各成形条件で得られた成形品のソリ量について、5ショットごとの長辺ソリ、短辺ソリの比較を図10(a)(b)に示す。正の値は内ソリを示している。

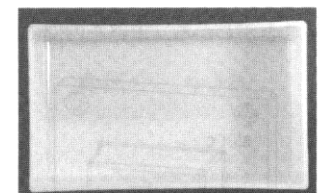
いずれの冷却水温においてもソリ量は切削金型の場合より、焼結金型の場合の方が小さい。コア水温をキャビティ水温より下げることによって、ソリ量は減少し、コア水温30℃、キャビティ水温70℃においては、焼結金型において、長辺のソリが0.3mmの内ソリ、短辺が0.15mmの外ソリとなっており、最もソリの少ない成形品となっている。冷却水路をコア内部に配置しない切削金型でもコア水温をキャビティ水温より下げることによってソリ量が減少しているが、コア水温とキャビティ水温との温度差を40℃まで与えても粉体造形金型の冷却水温50℃の場合とほぼ同じソリ量までしか減少していない。したがって、冷却水路をコア内部に配置し、水温格差を適切に与えることがソリ量の減少に非常に効果的である。



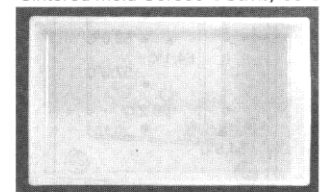
Cut mold Core50°C Cavity50°C



Cut mold Core30°C Cavity70°C



Sintered mold Core50°C Cavity 50°C



Sintered mold Core30°C Cavity70°C

(c) Picture of the products

Fig.10 Comparison on the amount of warp

一方コア水温をキャビティ水温よりも高くした場合には、粉体造形金型でも切削金型でもソリ量が増大している。

ショットにともなうソリ量の推移を見ると、切削金型においては、ソリ量が15ショット目まで徐々に増加してから安定しているのに対し、焼結金型においては、計測した5ショット目からほぼ安定した値となっている。冷却水路を金型の近傍に配置することによって、そり量をショットの初期から安定させることができている。

コア水温 50℃キャビティ水温 50℃、およびコア水温 30℃キャビティ水温 70℃の成形品について開口部側から撮影した写真を図 10(c)に示す。焼結金型のコア水温 30℃キャビティ水温 70℃の成形品のソリが小さいことが確認できる。

## 4.2 金型温度

### 4.2.1 1ショットにおける金型温度変化

樹脂の充填と冷却の過程で、金型表面温度も上下動を繰り返す。定常的な金型の温度サイクルに入っている 20 ショット目を取り上げて、焼結金型と切削金型の金型温度変化を比較する。それぞれの金型でもっともソリ量の少なかったコア水温 30℃、キャビ水温 70℃において、コア側上面温度のコア G、コア底部温度のコア C、キャビティ側底面コーナ部温度のキャビティ A の温度変化を比較したのが図 11 である。

コア G はゲートからの樹脂の流入が直接当たる箇所であり、射出時の温度上昇が最も大きい。充填後は徐々に温度が下がって、初期温度にもどっている。焼結金型と切削金型とで、温度上昇の幅を比べると焼結金型の方が大きい。これは金型材の熱伝導率が焼結金型の方が小さいために、このショットの短い時間の間では金型表面に熱が溜まりやすいためと考えられる。その後の冷却で戻る温度が切削金型の場合と比べて低く保たれるのは、水路による冷却のためである。切削金型では冷却水路がコア内を通過していないために、1 サイクルで戻る温度がコアの冷却水温よりもはるかに高くなっている。コア C は樹脂が最後に充填する箇所、温度が上昇する時間が最も遅く、上昇量も小さい。冷却過程においては型開き時点 (20s) の前に温度が一定となっている。キャビティ A はキャビティ面コーナ部分の温度であり、やはり焼結金型の方がショット時の温度上昇幅は大きい。サイクルごとに戻る温度は、キャビティ水温にほぼ等しくなっている。

### 4.2.2 金型温度の継続的变化

ショットにともなう金型温度の変化について、コア水温 50℃、キャビ水温 50℃におけるコア G の、毎回の射出開始 20s 後の温度を取り上げて比較したのが図 12 である。水路をコア内部に含まない切削金型ではショット数に応じて徐々に温度が変化し、温度が安定するのに 10 ショット程度必要とするのに対し、水路を内蔵している焼結金型においては最初から温度が一定となっていることがわかる。水路を内部に配置することで、冷却水

温に応じた安定した金型温度が得られることがわかる。

### 4.2.3 金型温度分布

繰り返しのショットサイクルにおいて戻る金型温度として、射出開始から 20 秒後の温度を取り上げ、金型の表面温度分布を比較する。冷却水温度 50℃における焼結金型と切削金型の温度分布の比較を図 13 に示す。焼結金型においては、コア上面とコア底面との温度差がほとんどなく、コア表面の温度がほ

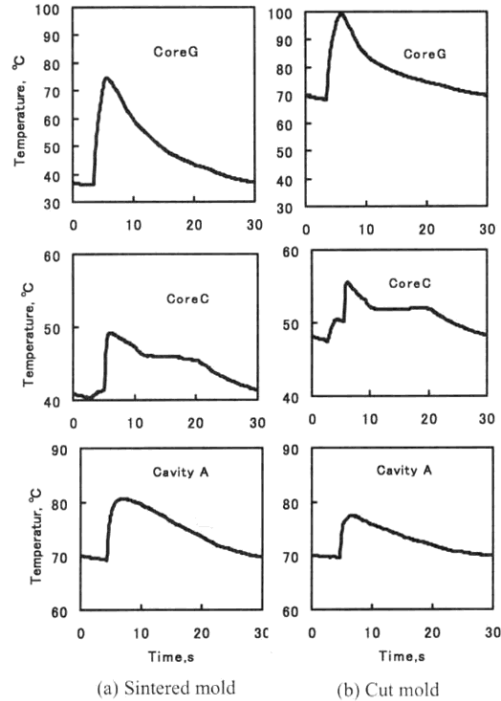


Fig.11 Comparison of the surface temperature change in the shot cycle in the case of core 30°C and cavity 70°C

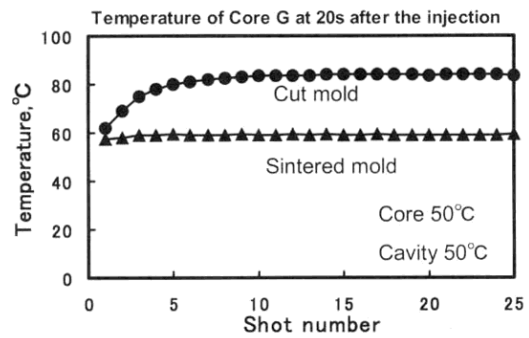


Fig.12 Comparison on the transient change of the mold temperature

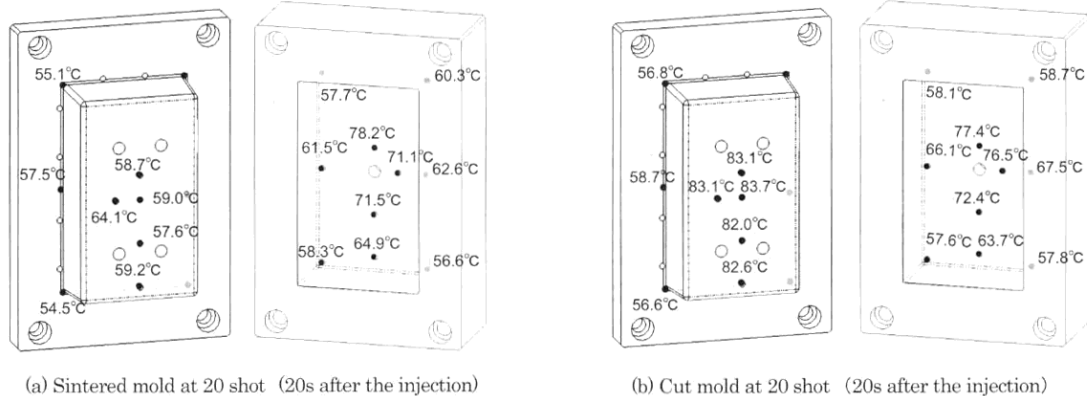


Fig.13 Comparison on the temperature distribution in the case of core 50°C and cavity 50°C

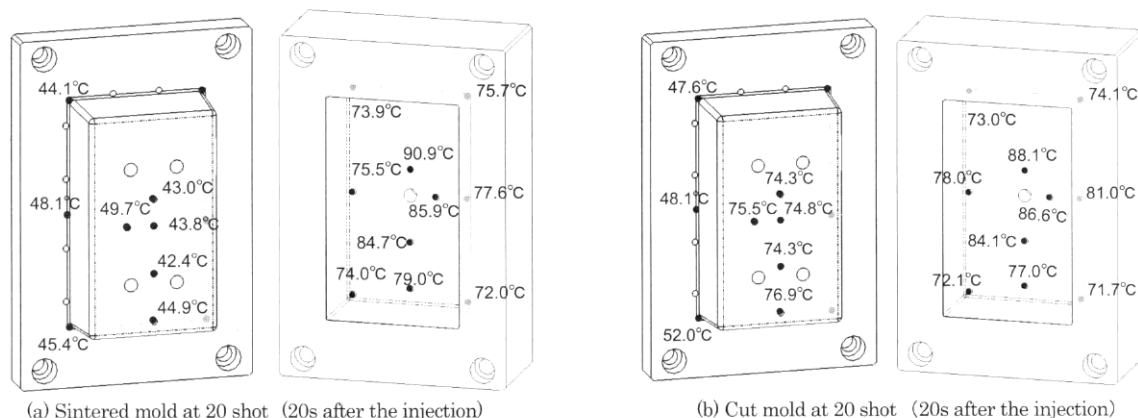


Fig.14 Comparison on the temperature distribution in the case of core 30°C and cavity 70°C

ほぼ均一となっている。一方キャビティ面はゲート部の温度を頂点として同心円状の等温度を持つ分布となっている。コア側の温度がおよそ 60°C であるのに対し、キャビティ側底面の温度が中心で 72°C、コーナでおよそ 60°C となっている。切削金型においては、コア上面の温度が 80°C を超える温度にまで上昇しており、コア底面部の温度とは約 25°C の温度差がある。一方キャビティ底面の温度は焼結金型の場合とほぼ同様で、ゲート部中心付近で 77°C、コーナ部で 58°C の温度勾配を持つ同心円状の等温度を持つ分布となっている。

コア水温 30°C、キャビティ水温 70°C における温度分布の比較を図 14 に示す。焼結金型においては、コア表面の温度は約 45°C に均一化している。キャビティ底面はゲート部を中心とした温度分布で、中央部で 90°C、コーナ部で 72°C である。キャビティ底面の温度平均を 80°C とすれば、キャビティ側の金型温度に比べ、コア側の金型温度はおよそ 35°C 低くなっている。切削金型においては、コア水温を 30°C と低くしたものの、コア上面の温度を約 75°C までに抑えるにとどまっている。コア水温 50°C の場合と比べ、水温を 20°C 下げたが、金型温度の低下は約 10°C となっている。キャビティ底面はゲート付近で 88°C、コーナ部で 72°C となっている。

このように冷却水路をコア内部に持たない切削金型ではコア上面の温度上昇が著しく、コア底面部と大きな温度差を生じるのに対し、冷却水路をコア内部に持つ焼結金型では、コア表面の温度が均一になっている。

## 5. 考 察

### 5.1 成形品のソリと金型温度

冷却水路をコア内部に配置した焼結金型において、コア水温を 30°C、キャビティ水温を 70°C と格差をつけることによって、成形品のソリを非常に小さくすることができた。成形品のソリの変化と金型温度とを比較すると、ソリの最も小さかったコア水温 30°C、キャビティ水温 70°C の場合 (図 14(a)) には、コア上面の温度がキャビティ底面の温度よりも約 25°C 低くなっている。一方焼結金型で水温 50°C の場合 (図 13(a)) と切削金型でコア水温 30°C、キャビティ水温 70°C の場合 (図 14(b)) のソリ量がほぼ等しい。これらの場合、コア上面の温度とキャビティ底面の温度がほぼ等しくなっている。またコア上面温度がキャビティ底面温度よりも高くなる水温条件では、ソリの量が大きい。従ってソリの量をゼロに近づけるためには、コア上面温度をキャビティ底面温度よりも適切に下げることが必要だと考えられる。コーナ部のソリの発生について図 2 で予測したように、樹脂内の温度分布を内側と外側で均一にするためには、熱の集中するコーナ内側において熱の吸収を大きくする必要があり、コーナ

部内側の金型温度をコーナ部外側の金型温度よりも低くすることによって、冷却の促進が図られ、樹脂内の温度が均一化したものと考えられる

### 5.2 粉体造形金型の特質

焼結金型を用いることによって冷却水路を内部に容易に造形することができる。この造形法の特質を活用することによって本研究で取り上げたような冷却促進が求められる箇所に冷却水路を配置することで効果的に樹脂を冷却し、樹脂の温度を均一化して形状精度を上げることができる。また金型表面に水路を配置することで、ショットの初期から金型温度を安定させることができる。

焼結金型の熱伝導率は一般の金型材と比べて低いため、成形時には金型表面温度の上昇量は一般の金型材の場合より大きい。熱伝導率は低い、冷却水路を金型表面の近くに配置することで、金型をすばやく冷却することができる。

## 6. 結 言

レーザによるスティール粉体の焼結造形法を活用して、箱形の成形品を対象としてコア内部に冷却水路を持つ射出成形金型を造形した。コア側の冷却水温をキャビティ側の冷却水温よりも適切に低くすることによって成形品開口部のソリをなくすことができた。スティール粉体からのレーザ焼結金型は一般の金型鋼と比べ熱伝導率が低い、任意の立体造形が可能な特質を活かし、金型表面近傍の熱の集積する箇所に冷却水路を配置し、適切な冷却水温度を与えることで、冷却を促進し、形状精度の高い成形品を得ることができる。

金型加工において (株) 北星の川田五市民にお世話になった。射出成形実験は富山県金型協同組合で行い、同組合の堀内貢氏にお世話になった。本研究に対し、金型技術振興財団より平成 14 年度研究助成を受けた。

## 参 考 文 献

- 1) 中村良光, 吉田徳雄, 金属光造形複合加工による精密金型製作, 精密工学会誌, **69**, 9, (2003), 1242.
- 2) 前川克廣, レーザ応用積層造形法による R P, 精密工学会誌, **70**, 2, (2004), 167.
- 3) 鈴木裕, 金型技術, 日本機械学会誌, **107**, 1027, (2004), 456.
- 4) 米山猛, 他 7 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), 精密工学会誌, **67**, 12, (2001), 1991.
- 5) 香川博之, 他 7 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), 精密工学会誌, **68**, 8, (2002), 1057.