

金属光造形複合加工金型を用いた射出成形サイクルタイムの短縮

米 山 猛^{*1}・香 川 博 之^{*1}・末 廣 栄 覚^{*1}・阿 部 諭^{*2}・宮 丸 充^{*3}

Reduction in Injection Cycle Time Using a Milling-Combined Laser Metal Sintered Mold

Yoneyama, Takeshi^{*1}/Kagawa, Hiroyuki^{*1}/Suehiro, Yoshiaki^{*1}/Abe, Satoshi^{*2}/Miyamaru, Mitsuru^{*3}

By composing a cooling channel just near the mold surface using the milling-combined laser metal sintering method, cooling during injection is promoted and the cooling time is reduced. In order to evaluate this effect, a cone with ribs inside the upper part is picked up. A spiral-cooling channel is fabricated along the side surface of the mold core and also between the ribs in the upper part. To compare with this, a steel mold with machined baffle channels was made. The diameter of the upper part of the molded cone was chosen as an evaluation dimension. The temperature on the upper surface of the core is kept low at around the cooling water temperature in the case of sintered mold during the cycle of the injection. On the other hand, the temperature on the upper surface of the steel mold increases far higher than the cooling water temperature. Cycle time for the same shrink ratio in the upper part of the molded cone was 25 s in the sintered mold and 40 s in the steel mold. Owing to the cooling time reduction, cycle time of the injection molding was reduced 35% by using the sintered mold with cooling channels. Simulation is available to evaluate the mold temperature distribution and is useful for improving the arrangement of cooling channels in the process of mold design.

Key words : Injection molding/Cooling channel/Cycle time/Laser metal sintering

1. 緒 言

金属光造形複合加工法は、図1のように、金属粉体層にレーザを照射して焼結させ、積層造形するとともに、一定量の積層ごとに焼結させたパターンの周縁をエンドミルで切削加工して、最終的に切削加工表面で仕上げられた立体を造形していく方法である¹⁾。この方法を射出成形の金型作りに適用すると、従来は切削加工や放電加工を駆使しなければ製作できなかった複雑な金型でもワンプロセスで短

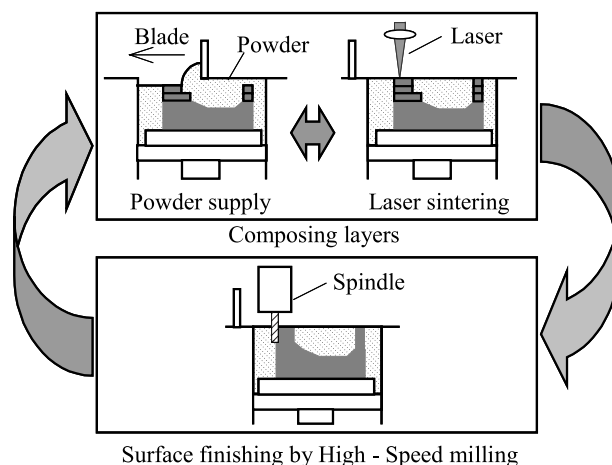


Fig. 1 Milling-combined laser metal sintering process

時間に作成することができる。そして金型造形の過程で、金型内に任意の冷却水路を組み込むことができる。金型内に冷却水路を組み込むことによって、金型温度を均一化し

^{*1} 金沢大学大学院自然科学研究科
金沢市角間町 (〒920-1192)

Faculty of Engineering, Kanazawa University
Kakuma-machi, Kanazawa, 920-1192, Japan

^{*2} 松下電工(株)生産技術研究所
Production Engineering Research Laboratory, Matsushita
Electric Works Ltd

^{*3} 宮丸精密金型(株)
Miyamaru Precision Mold Co. Ltd
2007. 3. 12 受理

て、射出成形品の形状精度を向上させることができる^{2)~6)}。一方冷却水路を金型表面に配置することによって、樹脂の冷却を促進して、冷却時間を短縮し、射出成形のサイクルタイムを向上させることができると期待される⁷⁾。本研究では、金属光造形複合加工金型における水路の配置法、サイクルタイム短縮の評価法、CAEによる評価などについて述べ、金属光造形複合加工金型による射出成形の冷却時間短縮によるサイクルタイムの短縮を確認することを目的とする。モデルサンプルとして、コーン形状の成形品を取り上げて、金属光造形複合加工法によって冷却水路を金型表面に沿って配置した金型を製作し、射出成形時の温度や圧力を計測し、成形品の寸法を計測する。同じ成形品を作成する金型を鋼材からの加工でも製作し（これを鋼材金型と呼ぶ）、同様の成形を行って金型温度や成形品寸法を比較し、金属光造形複合加工金型を用いることによる冷却時間短縮の評価を行う。

2. 成形対象

射出成形のモデル対象として、図2のようなコーン状の成形品を取り上げた。このような形状の射出成形においては、コーン内部の金型コアに熱が集まって蓄積され、樹脂の冷却に時間がかかる場合が多いからである。コーン内部の上面には円周状のリブをつけてある。従来の金型では、

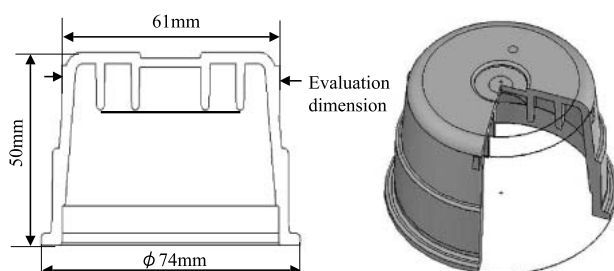


Fig.2 Specimen for the evaluation of cycle time

コア内にバッフルなどの冷却穴を設けて冷却を促進することが多いが、実際にはコーン内にリブなどの構造があって、冷却穴を設けにくい場合が多い。この成形品は、コーン内の上部にリブ等があって、従来法では冷却しにくい成形品の例となっている。冷却時間の評価を行うために、熱収縮が大きいと考えられるコーン上部の外周部に、成形品の寸法を計測しやすい平面を持つ突起を4箇所作り、この突起間の寸法を評価寸法とした。この評価寸法は金型寸法で61mmである。図2には成形品の他の主要寸法（金型寸法）も示している。

3. 金型の設計と製作

金属光造形複合加工法を用いれば、金型内部に曲がった水路でも配置することができる。水路配置にあたって、まず基本的に考慮することは、次のようなことである。

- ①金属光造形材自身の熱伝導率はおおよそ $10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ で、鋼材の熱伝導率 $30 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ に比べて低い。
- ②水路を金型表面近くに配置することによって、金型材自身の熱伝導率は低くても、金型表面温度を低く保ち、樹脂の冷却を促進する。

一方、冷却水路の穴を造形する際には、次のような制約条件がある。

- ①水平方向の冷却穴の上半分はオーバーハングとなり、未焼結の粉体の上に焼結していくことになるので、大きな穴径の上半分を造形するのは難しくなる。現状では穴径は5mmぐらいを基準とする。
- ②金型表面と穴内面との距離は金型の強度を考慮して3mm程度の厚みを設ける。

これらのことを考慮して、図3のような水路を設計した。

(a)の水路1が最初に製作した金型（これを金属光造形金型1と呼ぶ）で、(b)の水路2はそれを改善したもの（これを金属光造形金型2と呼ぶ）である。

まず金型コアの水路については、コアの側壁に沿って、

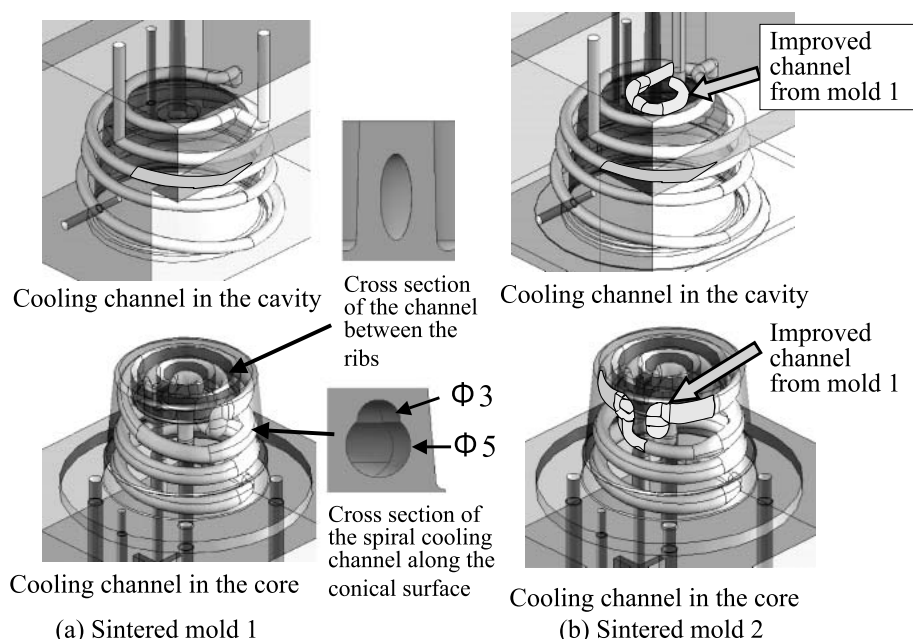


Fig.3 Cooling channels in the laser metal sintered mold

らせん状の水路を配置し、上部のリブ溝のある部分には溝間に円周状水路を3箇所入れ、それらの水路を連結し、中心部を通して戻る水路とした。

側壁に沿ってらせん状に配置した水路の断面は、図の中央部に示したように、直径の大きい丸穴（直径5 mm）の上部に直径の小さい丸穴（直径3 mm）を重ね合わせた「だるま」形状とした。これは、水路断面上部（オーバーハングとなる部分）の造形を容易にするとともに断面積と断面の周長を増加させて、冷却を増進させる効果があると考えたからである。コア上部リブ溝間の円周状水路については、縦長の楕円断面形状の水路を配置した。

水路1においては、らせん水路を最上部の円周水路につなげる部分において、らせんの角度のまま円周水路に接続して、その後円周水路を一周までしないうちにリブの下へくぐらせて内側の水路へつなげたために、金型コーナ部の表面近くに水路が通らない領域があった。それを改善して、コーナ部の円周水路をできるだけ一周回るようにしたのが水路2である。

金型キャビティ内にもコーンの円錐側壁に沿ってらせん状に水路を配置したが、水路1では、コーン上部平坦部のゲートの周囲には水路を配置しなかったため、ここにも一周の円状水路を回すように配置したのが水路2である。

金属光造形した金型の外観を図4に示す。コアの外周面については、造形した後に切削加工することが容易なので、すべてを光造形した後に切削加工を施した。実験後に金属光造形金型1を縦に断面カットした写真を図5に示す。らせん状に配置した水路の断面および、リブ間に配置した楕円水路の断面が見える。リブ間の水路は、図面上では横3 mm、縦8 mmの楕円であったが、水路内には切削加工

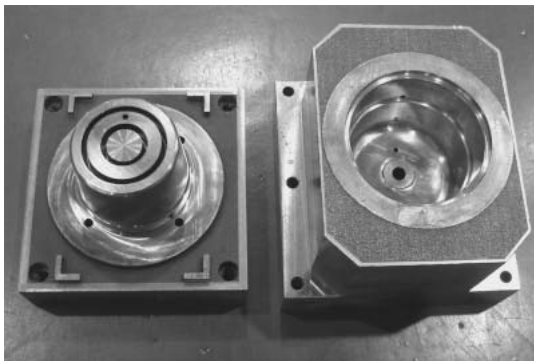


Fig. 4 Fabricated mold by laser metal sintering



Fig. 5 Cross section of the sintered mold

を行わず、表面の焼結層の厚みを大きめにとったために、造形した穴の横幅は2 mmになっていた。

一方冷却時間を比較するために、従来の製作方法である、鋼材から切削加工や放電加工を用いて製作する金型を製作した。設計した鋼材金型の構造を図6に示す。コアのリブのついた部分は、通常鋼材で作る場合に考えられる構造として分割金型とした。冷却水路は縦穴に遮蔽板をつけて、穴の上端で流れが折り返すバッフル水路を、分割コアの下部まで3箇所設けた。また金型キャビティにはドリル穴による直線水路をコーンの下部と上部に設け、それらをつないだ水路とした。製作した鋼材金型コアを図7に示す。

成形品の寸法を評価する突起間の寸法は図面指示で61 mmであるが、金型製作後3次元測定機を用いて、三つの金型の寸法を計測したところ、鋼材金型で61.06 mm、金属光造形金型1で61.06 mm、金属光造形金型2で61.03 mmであった。

4. 射出成形

4.1 射出成形条件

成形樹脂にはPOM（Polyplastics 製ジュラコン M 90 S）を用いた。POMを選んだ理由は、一般に比較的強度の高い樹脂としてよく用いられること、結晶性樹脂で、充填後の冷却過程の違いによってそりなどの変形も生じやすい材料だからである。射出成形条件を表1に示す。射出成形の

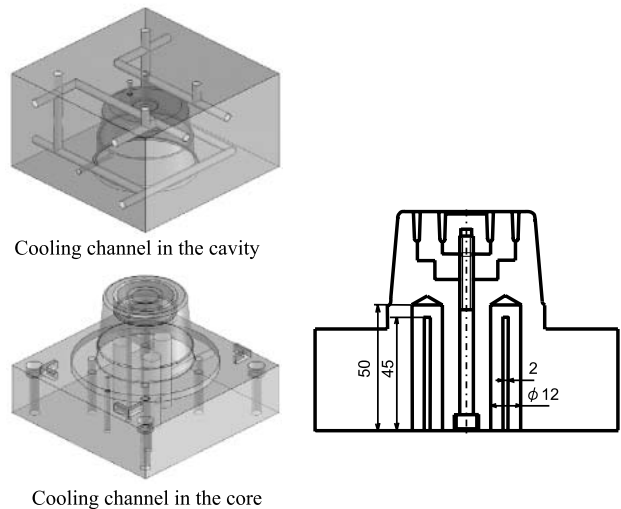


Fig. 6 Cooling channels in the steel mold

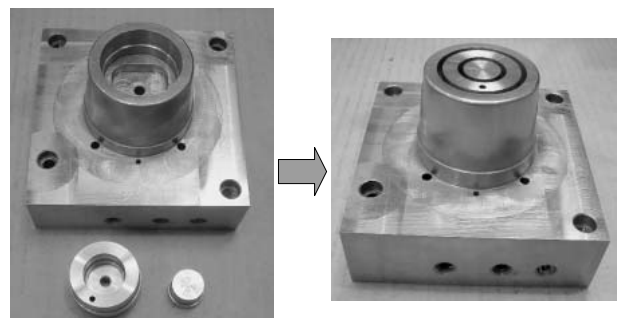


Fig. 7 Machined steel mold

Table 1 Injection molding condition

Resin		POM				
Cylinder temperature		190℃				
Molding time		7 s				
Injection pressure		98 MPa				
Hold pressure	Hold time 1	2 s				
	Hold pressure 1	118 MPa				
	Hold time 2	2 s				
	Hold pressure 2	59 MPa				
Cooling temperature	Core	60℃				
	Cavity	60℃				
Cooling time						
Cooling time (s)	6	11	16	21	26	

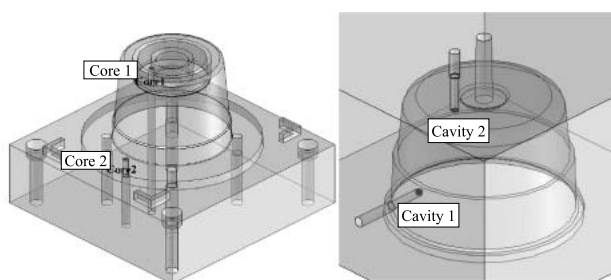


Fig.8 Temperature measuring points

シリンダ温度を 190℃ とし、充填圧力 98 MPa で充填時間 7 s、保圧は 118 MPa で 2 s および 59 MPa で 2 s とした。冷却水の温度は、コア水路、キャビティ水路とも 60℃ とした。冷却時間を 6 s（サイクルタイム 22 s または 24 s）から 26 s（サイクルタイム 42 s または 44 s）まで 5 s ずつ変えて、30 ショットずつ成形を行った。

4.2 金型温度の比較

金型温度の測定点を図 8 に示す。金型コアでは、上面と下端面、金型キャビティでは、上面と側面に温度検出ピンを挿入した。温度検出ピンはピンの側面に溝を掘って、直径 1 mm のシース熱電対を金型表面から 1 mm の深さのところへ配置したものである。これによって、金型表面に近い部分の温度が検出できる。

金属光造形金型 1 によっても、鋼材金型と比べて冷却効果が現れたが、水路を改善した金属光造形金型 2 の方が鋼材金型に対する冷却効果が大きかったので、ここでは、鋼材金型と金属光造形金型 2 の温度を比較する。冷却時間 6 s でサイクルごとの温度変化が安定した後の、金属光造形金型 2 の温度を図 9 に、鋼材金型の温度を図 10 に示す。両者を比較すると、特にコア上面部のコア 1 温度に大きな違いがある。鋼材金型では、130℃ から 140℃ の間をショットごとに上下動しているのに対し、金属光造形金型 2 では 70℃ から 95℃ に抑えられている。1 ショットにおける上下動の幅が鋼材金型の場合より大きいのは、焼結材自身の熱伝導率が低いためであると考えられるが、冷却水路の効果で、平均温度が低く保たれている。また他の箇所の温度についても、鋼材金型では、70℃ 前後で温度が変動しているが、金属光造形金型では 60℃～70℃ に抑えられており、冷却水温度 60℃ に近い温度が保たれている。したがっ

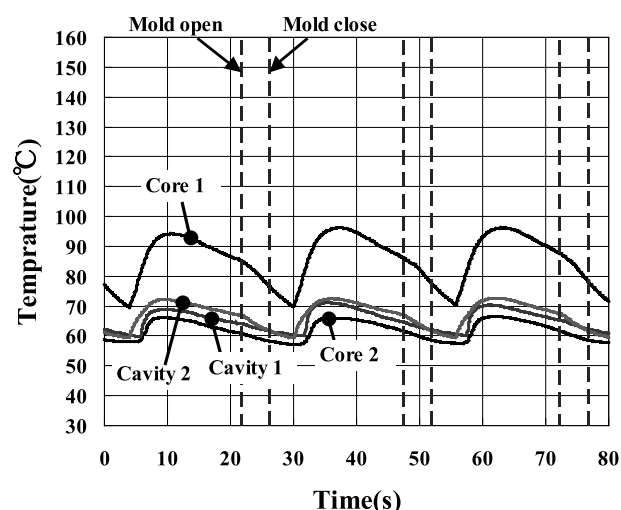


Fig.9 Temperatures on the sintered mold 2 in case of cooling time 6 s

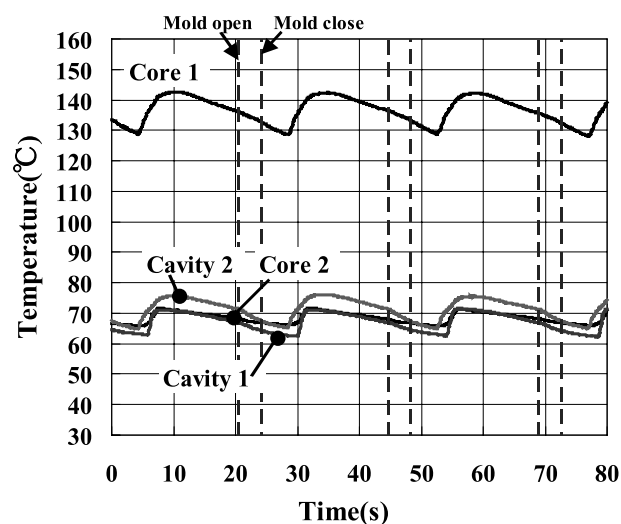


Fig.10 Temperatures on the steel mold in case of cooling time 6 s

て、冷却水路を配置した金属光造形金型コアでは、上面の温度上昇が抑えられ、かつ上面と底部の温度差が少ない均一な金型温度になっている。

冷却時間を変えて、サイクルタイムを変えたときの、型開き時のコア 1 温度の変化を、金属光造形金型と鋼材金型で比較して図 11 に示す。鋼材金型においては、冷却時間を 26 s とってサイクルタイムを 42 s にしても、コア上面の温度は 121℃ までしか下がらず、金属光造形金型における冷却時間 6 s における温度 85℃ よりもはるかに高い。

このように、金属光造形複合加工法によって、冷却水路を金型表面近くに配置することによって、冷却時間が短くても温度の上がりやすい金型コア内部をよく冷却することができる。

4.3 成形圧力の比較

金型内の圧力を検出するセンサーの配置を図 12 に示す。

金型コアの底部（コーン成形品の縁の底面）に挿入した 4 本のエジェクタピンの先端に近い部分を四角柱形状にし、その 4 面にひずみゲージを貼り付けて荷重計とした。検出

した荷重をピンの断面積で割って圧力とした。この荷重計の出力特性は市販のEPセンサー（双葉電子製）と同様であることを確認した。

成形時の圧力比較の例として、金属光造形金型1における1ショットの圧力波形と鋼材金型における圧力波形を比較して図13に示す。鋼材金型における圧力測定ではピン3で不具合が生じたため、他の3点の圧力が表示されているが、鋼材金型と金属光造形金型とで違いはほとんどなく、成形圧力に関しては、金属光造形金型を用いた場合と、鋼材金型を用いた場合に違いがないことがわかる。

5. サイクルタイム短縮の評価

金型温度が定常的な温度サイクルを示すようになった10～12ショット目の成形品について、成形品に設けた評価寸法を、マイクロメータで測定した。サイクルタイムを評価する項目として、この成形品評価寸法と対応する金型寸法との差を求め、金型寸法に対する割合を収縮率とする。

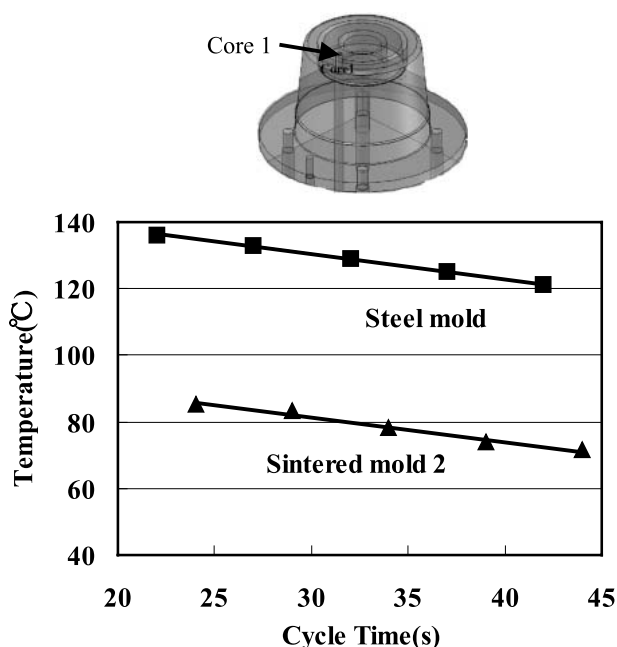


Fig. 11 Change of the temperature of the core top surface with the change of cycle time

サイクルタイムと収縮率との関係を図14に示す。鋼材金型による成形品に比べ、金属光造形金型による成形品は、成形後の熱収縮が小さいため収縮率が小さくなっている。鋼材金型においては、サイクルタイムを22 s(冷却時間6 s)から42 s(冷却時間26 s)まで増加することによって、収縮率が3.2%から2.8%まで低減しているが、金属光造形金型2ではサイクルタイム24 sで既に2.8%が得られており、サイクルタイム44 sでは2.3%まで低減している。金属光造形金型1による成形品の収縮率は金属光造形金型2のものよりわずかに大きい程度である。鋼材金型で40 sかかってできる収縮率を金属光造形金型では25 sで達成していることになり、同じ寸法を得るのにサイクルタイムを15 s縮めることができる。金型コア上部を金属光造形金型の水路によって冷却できたので、樹脂の冷却が促進され、その後の熱収縮を小さくすることができたと考えられる。

冷却時間の短縮によって、型締め、型開き、成形品取り出しなど他の時間は同じでも、射出成形のサイクルタイムを短縮することができる。本成形品の射出成形のサイクルタイムは図15に示すように、全体として35%短縮することができた。

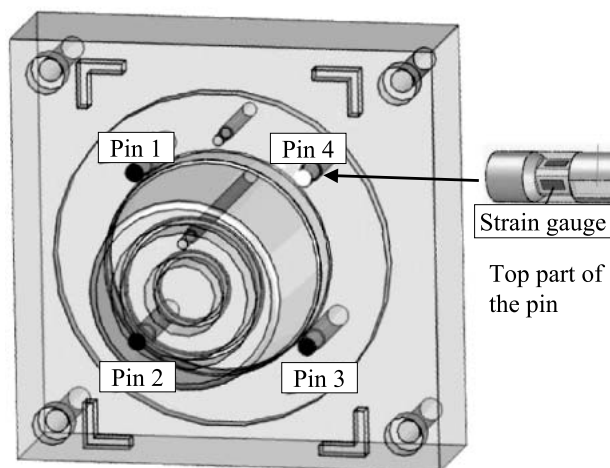


Fig. 12 Pressure sensors in the mold

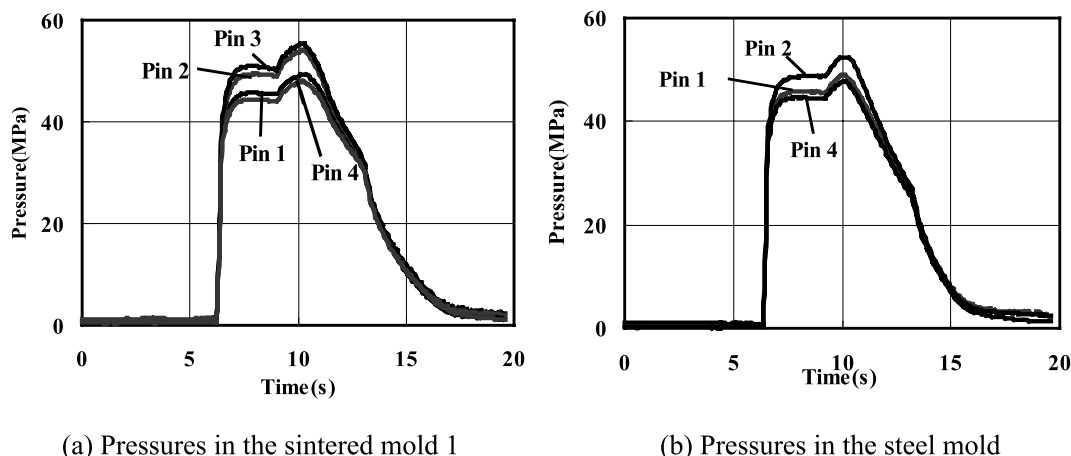


Fig. 13 Comparison of the pressure during the injection molding

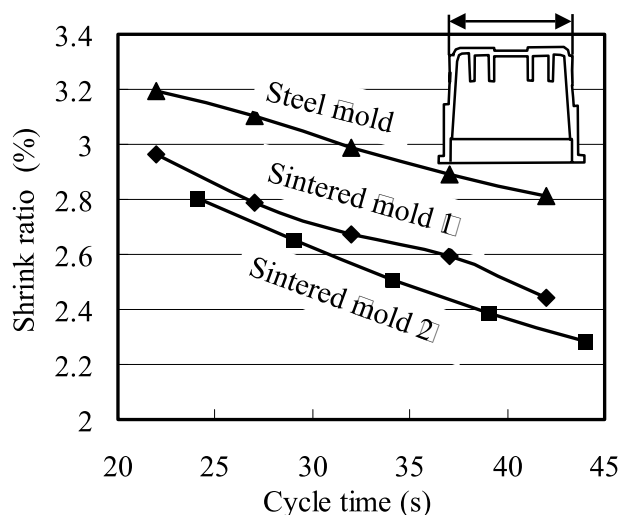


Fig. 14 Change of the shrink ratio of the evaluation dimension with the cycle time

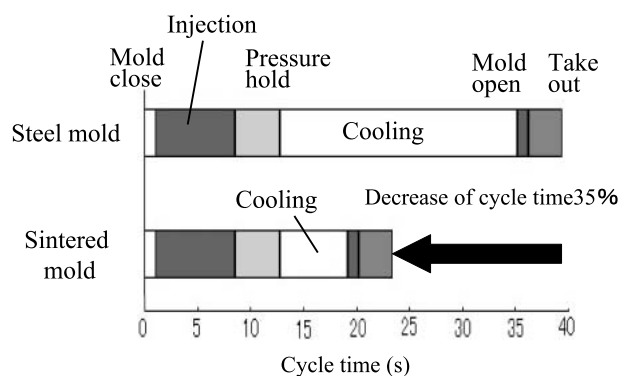


Fig. 15 Decrease of cycle time by reducing the cooling time

6. CAE を用いた評価

金属光造形金型による水路設計を行う場合、CAE を用いてあらかじめ金型温度の評価を行いたい。そこで射出成形シミュレーションソフト TIMON（東レエンジニアリング）を用いて、金型温度を解析した。水路1を水路2に変更するに当たっては、TIMON による解析を利用して改善箇所を評価した。

まず鋼材金型と金属光造形金型2について、金型温度の解析結果を比較する。TIMON においては、定常的な射出成形サイクルに達したときの、樹脂からの発熱量と金型への伝熱量のつりあいから、平衡が保たれる金型温度を解析している。したがって、解析の結果得られる金型表面温度は1サイクルにおいて上下動する金型表面温度の平均的な値が算出されると考えられる。金型コア表面温度について、冷却時間6sの場合の鋼材金型と金属光造形金型2の温度分布の比較を図16に示す。鋼材金型においてはコア上面の温度が120℃～130℃と高くなっているのに対し、金属光造形金型2では、90℃程度に冷却されていることがわかる。それぞれの温度は実測した金型表面温度とよく一致している。したがってシミュレーションソフトを使って、冷却水路を配置した金型について、あらかじめ金型温度を

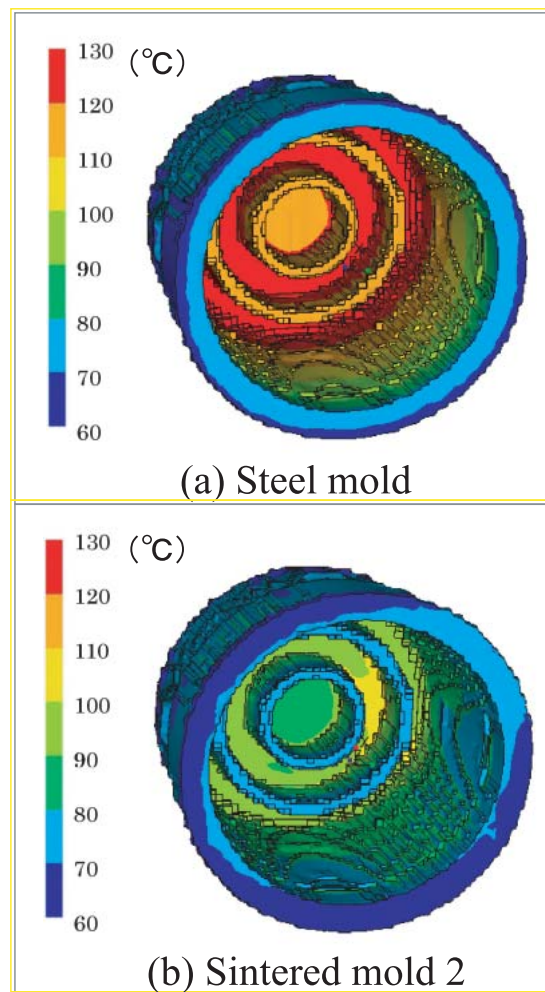


Fig. 16 Surface temperature analysis

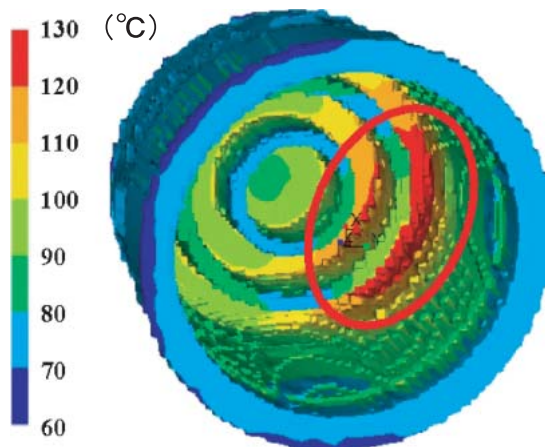


Fig. 17 High temperature region in the case of sintered mold 1 estimated by a simulation

評価することが可能である。

金属光造形金型1の場合の金型コア表面温度を図17に示す。らせん状の水路が円状水路につながる部分で金型コーナから水路までの距離が遠い部分があったため、この部分の金型表面温度が非常に高くなっている。金属光造形金型材自身の熱伝導率は通常の金型材の3分の1ぐらいしかないため、水路を金型表面にそって均一に配置しないと、温度のむらが大きくなることがわかる。実際、射出成形を

行ってみると、成形品コーナのこの部分の樹脂がよく冷えないままになるため、成形後の収縮が大きく、成形後にくぼみを生じるという問題を生じた。

したがって、金属光造形複合加工金型において、水路配置設計を行う場合、射出成形シミュレーションを用いて金型温度などの予測を行い、適切な水路配置を確認することが大切である。

7. 結 言

金属光造形複合加工法を用いて、コーン状の成形品を作成する金型内にらせん状の水路を配置し、コア内の冷却を促進して、樹脂の冷却を促進し、射出成形の冷却時間を短縮してサイクルタイムを減少することができることを示した。金属光造形法を用いると、コア上部にリブを有する場合にもリブの間に水路を回すことができ、コア上部の温度上昇を低減することができた。サイクルタイムの評価方法として、成形品における評価寸法の金型寸法に対する収縮率とサイクルタイムとの関係を求めて比較し、評価した。

一方、金属光造形金型において冷却水路を金型表面近くに配置するに当たっては、金型表面との距離を均一に配置することが重要であり、不均一な場合には局部的に金型温度の高いところができて成形品の不良を生じ、このような温度分布をあらかじめCAEを用いてシミュレーションし、より均一な温度分布を得る水路配置を設計することで効果

が得られることを示した。

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。(株)ネイブ中村芳信氏、(社)人間生活工学センター辻摩弥氏をはじめ、お世話になった方々に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Abe, S., Higashi, Y., Fuwa, I., Yoshida, N. and Yoneyama, T.: 11th Int. Conf. on Precision Engineering, 285, (2006)
- 2) 米山猛, 香川博之, 他 6 名: 精密工学会誌, **67**(12), 1991 (2001)
- 3) 香川博之, 米山猛, 他 6 名: 精密工学会誌, **68**(8), 1057 (2002)
- 4) 米山猛, 香川博之, 他 5 名: 精密工学会誌, **71**(3), 347 (2005)
- 5) 米山猛, 香川博之, 他 6 名: 型技術ワークショップ 2004 講演論文集, 22(2004)
- 6) 末廣栄覚, 米山猛, 香川博之, 大原功, 阿部諭, 宮丸充: 2005 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 585(2005)
- 7) 米山猛, 香川博之, 宮丸充, 阿部諭: 型技術者会議 2006 講演論文集, 230(2006)